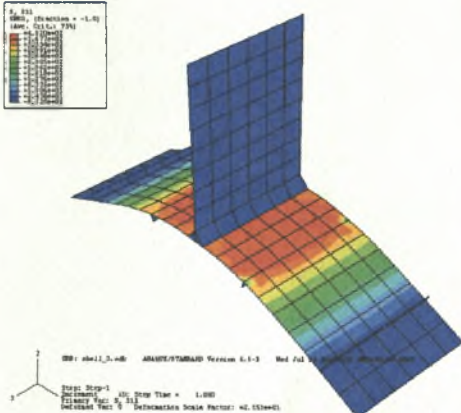
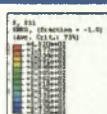


Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
«Εφαρμοσμένη Μηχανική και Προσομοίωση Συστημάτων»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση Συμπεριφοράς σε Κόπωση Συγκολλημένων Επίπεδων
Μεταλλικών Ελασμάτων από Χάλυβα Υψηλής Αντοχής



παραδόθηκε από

Κων/νο Σπ. Παπαχρήστου

Διπλ. Πολιτικό Μηχανικό Παν. Θεσσαλίας

για την κάλυψη μέρους των υποχρεώσεων για τη λήψη του μεταπτυχιακού διπλώματος

επιβλέποντες καθηγητές : Δρ. Φίλιππος Περδικάρης, Δρ. Σπυρίδων Καραμάνος

Βόλος, Σεπτέμβριος 2007



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5960/1
Ημερ. Εισ.: 15-10-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
624.17
ΠΑΠ

*Στους γονείς μου
και
στους δασκάλους μου*

Συμβουλευτική επιτροπή

Φίλιππος Κ. Περδικάρης

καθηγητής τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Παν. Θεσσαλίας

Σπυρίδων Α. Καραμάνος

επίκουρος καθηγητής τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν.
Θεσσαλίας

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

1. Φίλιππος Κ. Περδικάρης

καθηγητής τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Παν. Θεσσαλίας

2. Σπυρίδων Α. Καραμάνος

επίκουρος καθηγητής τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Παν.
Θεσσαλίας

3. Ευριπίδης Σ. Μυστακίδης

αναπληρωτής καθηγητής τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Παν. Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Ο συγγραφέας της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας θα ήθελε να ευχαριστήσει τη συμβουλευτική επιτροπή, τους κυρίους Φίλιππο Περδικάρη και Σπυρίδωνα Καραμάνο που χωρίς την καθοδήγηση και τις απαραίτητες συστάσεις των οποίων, δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Θερμές ευχαριστίες δίνονται επίσης στους μεταπτυχιακούς φοιτητές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας και ιδιαίτερα στην υποψήφια διδάκτορα του τμήματος κυρία Σωτηρία Χουλιάρη της οποίας η συνεισφορά για την ολοκλήρωση του παρόντος πονήματος ήταν αρκετά σημαντική. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους όσους προσέφεραν ηθική υποστήριξη κατά τη διάρκεια της ερευνητικής δραστηριότητας της οποίας αποτέλεσμα είναι η παρούσα διπλωματική εργασία.

Κων/νος Σπ. Παπαχρήστου

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Παν. Θεσσαλίας

Βόλος, Σεπτέμβριος 2007

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Γενικά για την Κόπωση

- 1.1. Το φαινόμενο της κόπωσης στις κατασκευές
- 1.2. Σκοπός της έρευνας

Κεφάλαιο 2. Ανασκόπηση των Κανονισμών για τον Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης

- 2.1. Εισαγωγή
- 2.2. Σύγκριση επικρατέστερων μεθόδων σχεδιασμού έναντι κόπωσης
- 2.3. Μέθοδος *Hot Spot Stress* σε συγκολλημένα μεταλλικά ελάσματα
- 2.4. Ανασκόπηση Υπαρχόντων Κανονισμών για Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης
 - 2.4.1. *DnV Recommended Practice RP-C203*
 - 2.4.2. *British Standard 7608*
 - 2.4.3. *Eurocode 3 (Part 1.9 General Rules and Rules for Buildings. Fatigue)*
 - 2.4.4. *API RP2A LRFD*
 - 2.4.5. *IIW Recommendations*

Κεφάλαιο 3. Εργαστηριακές Δοκιμές

- 3.1. Σκοπός των πειραμάτων
- 3.2. Εργαστηριακές δοκιμές και δοκίμια
- 3.3. Εργαστηριακός εξοπλισμός
- 3.4 Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης
 - 3.4.1. $\Delta\sigma=260 \text{ MPa}$ (1)
 - 3.4.2. $\Delta\sigma=260 \text{ MPa}$ (2)
 - 3.4.3. $\Delta\sigma=220 \text{ MPa}$
 - 3.4.4. $\Delta\sigma=200 \text{ MPa}$ (1)
 - 3.4.5. $\Delta\sigma=200 \text{ MPa}$ (2)
 - 3.4.6. $\Delta\sigma=180 \text{ MPa}$
 - 3.4.7. $\Delta\sigma=160 \text{ MPa}$ (1)
 - 3.4.8. $\Delta\sigma=160 \text{ MPa}$ (2)
 - 3.4.9. $\Delta\sigma=120 \text{ MPa}$

3.5. Διάγραμμα Εύρους Ονομαστικής Τάσης & Συνολικών Κύκλων Φόρτισης (S-N)

Κεφάλαιο 4. Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

4.1. Εισαγωγή

4.2 Προσομοίωση κάμψης τεσσάρων (4) σημείων με επιφανειακά πεπερασμένα
στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης

4.3 Προσομοίωση κάμψης τεσσάρων (4) σημείων με επιφανειακά πεπερασμένα
στοιχεία τύπου κελύφους.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

5.1. Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

Παράρτημα

Κεφάλαιο 1

1.1 Το φαινόμενο της κόπωσης στις κατασκευές

Το φαινόμενο της κόπωσης παρατηρείται σε κατασκευές ή στοιχεία κατασκευών τα οποία υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, συνήθως μη σταθερού εύρους. Τα φορτία που ασκούνται συνολικά δεν ξεπερνούν τα όρια αντοχής των κατασκευών, τα οποία προκύπτουν σε μονοτονική φόρτιση, αλλά τελικά μετά από ορισμένο χρόνο λειτουργίας των εξαρτημάτων (κύκλους φόρτισης) επέρχεται αστοχία. Κατασκευές στις οποίες έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της κόπωσης είναι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων υλών (σε υπέργειο, υπόγειο και υποθαλάσσιο περιβάλλον), γέφυρες, πλωτές πλατφόρμες άντλησης και αποθήκευσης καυσίμων, αεροσκάφη, μηχανικά συστήματα αυτοκινήτων (αποσβεστήρες) και διάφορες μεταλλικές κατασκευές που καταπονούνται από επαναλαμβανόμενα φορτία.

Η αστοχία λόγω κόπωσης προκαλείται με την επανάληψη των φορτίσεων και επιταχύνεται με το φαινόμενο της διάβρωσης που παρατηρείται σε *off shore* κατασκευές. Η αστοχία των εξαρτημάτων και των στοιχείων των κατασκευών λόγω κόπωσης που υπόκεινται σε φορτίσεις στην ελαστική περιοχή παρατηρείται στις περιοχές όπου υπάρχουν συγκεντρώσεις τάσεων λόγω γεωμετρίας ή στα σημεία συνδέσεων των στοιχείων. Μετά την πάροδο ορισμένων κύκλων φόρτισης δημιουργούνται ρωγμές στις περιοχές που έχουν παραμορφωθεί πλαστικά πλέον που οδηγούν τελικά στην αστοχία.

Η αστοχία λόγω κόπωσης επιταχύνεται σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα, καθώς και από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Βέβαια, σημαντικό ρόλο στην τελική αστοχία και στον χρόνο που θα έλθει αυτή παίζουν η συχνότητα των φορτίσεων αλλά και το εύρος της διακύμανσης των φορτίσεων.

Το φαινόμενο της κόπωσης έχει προσφέρει έδαφος, ειδικότερα τα τελευταία χρόνια που πολλές κατασκευές έχουν φτάσει στα όρια σχεδιασμού, για περεταίρω μελέτη και έρευνα. Σε πολλούς κανονισμούς προτείνονται τρόποι και υπολογιστικοί μέθοδοι για τον σχεδιασμό έναντι κόπωσης. Η σπουδαιότητα της δημιουργίας κανόνων σχεδιασμού για την έγκαιρη και οικονομικά αποδεκτή αποφυγή των αστοχιών λόγω κόπωσης προκύπτει από τη μεγάλη σημασία για την ασφαλή λειτουργία μεγάλων κατασκευών που αποφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη.

1.2 Σκοπός της έρευνας

Η ανάγκη για πιο ανθεκτικά υλικά και μεγάλης συνολικής αντοχής σε κόπωση έχει οδηγήσει μεγάλες βιομηχανίες και ερευνητές σε περεταίρω ανάπτυξη μεθόδων για παραγωγή χαλύβων, συγκεκριμένα, με μεγάλη αντοχή και όρια διαρροής. Οι νέοι αυτοί τύποι χαλύβων πρέπει να συμπεριληφθούν στους ήδη υπάρχοντες κανονισμούς στους οποίους δεν υπάρχουν οδηγίες για σχεδιασμό με χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής. Μία προσπάθεια για καθορισμό προτεινόμενων μεθόδων σχεδιασμού γίνεται και στην παρούσα εργασία της οποίας το αντικείμενο είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς συγκολλητών επίπεδων μεταλλικών πλακών σε κόπωση από χάλυβα υψηλής αντοχής.

Για τις ανάγκες ερευνητικού προγράμματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε συγκολλημένες επίπεδες μεταλλικές πλάκες από χάλυβα υψηλής αντοχής με ειδική μέθοδο συγκόλλησης. Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της καμπύλης σχεδιασμού, ονομαστικής τάσης και συνολικών κύκλων φόρτισης μέχρι την τελική αστοχία. Δεδομένου ότι στους ευρέως χρησιμοποιούμενους έως τώρα κανονισμούς δε γίνονται προτάσεις σχεδιασμού έναντι κόπωσης για δομικά μέλη κατασκευών από χάλυβα υψηλής αντοχής γίνεται προσπάθεια ώστε να ενταχθούν οδηγίες σε κανονισμούς που θα λαμβάνουν υπόψη και τη χρήση χαλύβων με τάση διαρροής άνω των 900 MPa.

Επίσης, γίνεται ανάλυση των επικρατέστερων μεθόδων σχεδιασμού έναντι κόπωσης και χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων στις περιοχές όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων και έχουμε και το άνοιγμα ρωγμών που οδηγούν στην τελική αστοχία.

Κεφάλαιο 2

2.1 Εισαγωγή

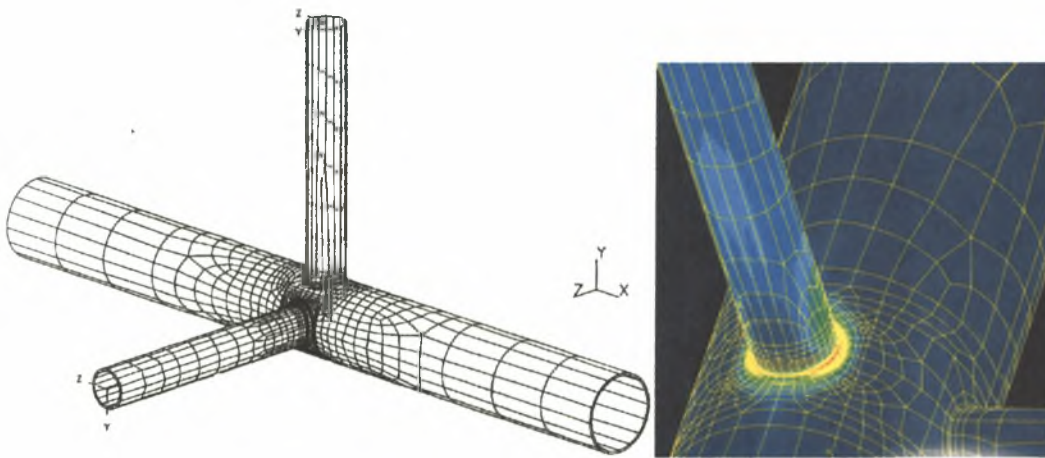
Σε παγκόσμια κλίμακα υπάρχουν πολλοί κανονισμοί σχεδιασμού των κατασκευών έναντι κόπωσης διαφορετικοί μεταξύ τους στη φιλοσοφία και στην προσέγγιση του θέματος. Μερικοί αλληλοκαλύπτονται στα θέματα σχεδιασμού ενώ άλλοι αντιμετωπίζουν το θέμα της κόπωσης διαφορετικά. Η σημασία που δίνει ο κάθε κανονισμός στο σωστό σχεδιασμό των μεταλλικών κατασκευών αλλά και μεταλλικών μελών έναντι κόπωσης είναι άμεση συνάρτηση της σπουδαιότητας της κατασκευής. Η ανάγκη για ύπαρξη σαφούς πλαισίου σχεδιασμού έχει γίνει επιτακτική την τελευταία δεκαετία, καθώς πολλές κατασκευές μεγάλης παραγωγικής σημασίας όπως πλωτές πλατφόρμες άντλησης και αποθήκευσης (FPSO's) καύσιμων υλών, γέφυρες, αγωγοί μεταφοράς καύσιμων υλών (υποθαλάσσιοι, υπέργειοι αλλά και υπόγειοι) μήκους πολλών χιλιομέτρων, αλλά και δεξαμενόπλοια απαιτούν ασφαλή σχεδιασμό ενώ πολλές από τις κατασκευές έχουν φτάσει το όριο ζωής που είχε υπολογιστεί σε φάση σχεδιασμού. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό ο σχεδιαστής της κατασκευής να γνωρίζει τους εναπομείναντες κύκλους ζωής που δύναται να φέρει η κατασκευή χωρίς να αστοχήσει. Οι δύο μεθοδολογίες σχεδιασμού που είναι αρκετά διαδεδομένες, με την τελευταία να αναπτύσσεται πρόσφατα, είναι η μέθοδος της κατηγοριοποίησης της κάθε περίπτωσης που μπορεί ο σχεδιαστής να αντιμετωπίσει ή *Classification Method* και η μέθοδος της ανάλυσης της κατασκευής προσεγγίζοντας την κρίσιμη περιοχή όπου αναπτύσσονται υψηλές τοπικές τάσεις ή *Hot Spot Stress Method*.

2.2 Σύγκριση επικρατέστερων μεθόδων σχεδιασμού έναντι κόπωσης

Η μέθοδος του *Hot Spot Stress* έχει προταθεί τελευταία ως μία εναλλακτική μέθοδος, για τον σχεδιασμό στοιχείων που αποτελούνται από συγκολλητά μεταλλικά ελάσματα, στην ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο *Classification*. Στη μέθοδο *Classification*, τα διάφορα στοιχεία της κατασκευής κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μητρικό υλικό από το οποίο προέρχονται, τη γεωμετρία τους και το είδος της συγκόλλησης και σε κάθε κατηγορία ή κλάση επιλέγεται η κατάλληλη καμπύλη σχεδιασμού, ονομαστικής τάσης – συνολικών κύκλων φόρτισης (S-N curve), η οποία προκύπτει συνήθως από πειραματικές δοκιμές πλήρους φυσικής κλίμακας δομικά μέλη κατασκευής. Βέβαια, αυτό συνεπάγεται ότι οι καμπύλες σχεδιασμού είναι αρκετές διότι σε κάθε κατηγορία θα πρέπει να αντιστοιχεί και μία

καμπύλη κόπωσης και είναι επίσης δυνατόν να μην υπάρχει καμπύλη η οποία να προέρχεται από μέλος κατασκευής ακριβώς ίδιο με αυτό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε μία νέα κατασκευή καθώς δεν είναι πάντα εύκολο να δοκιμαστούν πειραματικά αυτά τα μέλη.

Η μέθοδος του *Hot Spot Stress* («κρίσιμου σημείου») έχει σαν βάση διαφορετική φιλοσοφία η οποία προέρχεται από το γεγονός ότι η έναρξη της ρωγμής, η οποία τελικά οδηγεί στην αστοχία παρουσιάζεται τοπικά και αυτό συμβαίνει συνήθως στο σημείο όπου υπάρχει η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων. Η μεγαλύτερη διαφορά της από τη μέθοδο του *Classification* είναι ότι χρησιμοποιεί μία καμπύλη τάσης – συνολικών κύκλων φόρτισης αλλά σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται λεπτομερής και προσεκτικός καθορισμός της τιμής της τάσης το οποίο είναι πιο απαιτητικό από το να υπολογίζει κανείς μόνο την ονομαστική τάση. Στη συνέχεια αφού προσδιοριστεί η τάση είναι εύκολο να υπολογιστεί ο αριθμός των κύκλων ζωής απλά ανατρέχοντας σε μια καμπύλη. Αντίθετα, η μέθοδος *Classification* χρειάζεται μόνο την ονομαστική τάση (που θεωρητικά υπολογίζεται εύκολα) και την καμπύλη που αντιστοιχεί στο δομικό μέλος που σχεδιάζεται.



Σχήμα 2.2.1. Συγκολλητά σωληνωτά μέλη προσομοιωμένα με πεπερασμένα στοιχεία όπου φαίνεται η συγκέντρωση των τάσεων γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης (*Hot Spot*), Romeijn 1994.

2.3 Μέθοδος *Hot Spot Stress* σε συγκολλημένα μεταλλικά ελάσματα

Η μεθοδολογία *Hot Spot Stress* αρχικά προτάθηκε για το σχεδιασμό των συγκολλητών σωληνωτών μελών σε δίκτυα αγωγών ή σε δικτυωτούς φέροντες οργανισμούς (δικτυώματα). Στις συνδέσεις των συγκολλητών σωληνωτών μελών, όπου η γεωμετρία είναι αρκετά σύνθετη, η φόρτιση των μελών οδηγεί σε υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της σύνδεσης (βλ. σχήμα 2.2.1). Συνεπώς, οι ονομαστικές τάσεις που προκύπτουν από μία απλή ανάλυση της κατασκευής πρέπει σε εκείνα τα σημεία να πολλαπλασιαστούν με ειδικό συντελεστή που προκύπτει από την ανάλυση του κρίσιμου σημείου (*Hot Spot*) για να προσεγγιστεί επιτυχώς η τάση σε εκείνο το σημείο. Δηλαδή, η σχέση που συνδέει την ονομαστική τάση που προκύπτει από μία απλή ανάλυση της κατασκευής και της τελικής αυξημένης είναι η ακόλουθη:

$$\sigma_{hot-spot} = SCF \cdot \sigma_{nominal}$$

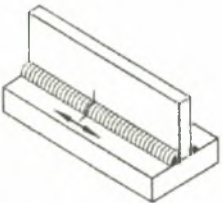
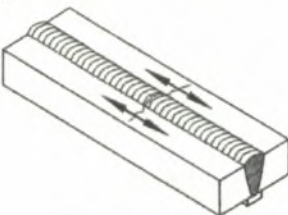
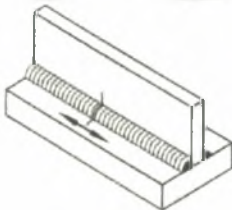
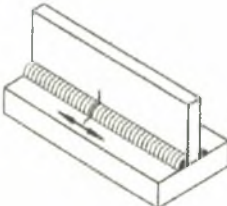
όπου *SCF* (*Stress Concentration Factor*) ο συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων στην κρίσιμη περιοχή.

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλοί τύποι συνδέσεων για τα σωληνωτά μέλη και κάθε τύπος σύνδεσης δημιουργεί, λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του, διαφορετική συγκέντρωση και κατανομή των τάσεων, πρέπει κάθε φορά να επιλέγεται ο κατάλληλος συντελεστής *SCF* για να πολλαπλασιαστούν οι ονομαστικές τάσεις. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές παραμετρικές σχέσεις για την εκτίμηση των *SCF* που λαμβάνουν υπ' όψη τη σύνδεση των μελών, το πάχος των στοιχείων στη σύνδεση, τη γωνία συγκόλλησης κ.α. (Kuang et al. 1977, Karamanos et al. 2000). Οι συντελεστές *SCF* είναι δυνατό να προκύψουν από ελαστική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και προσεκτικό υπολογισμό των τάσεων στα κατάλληλα σημεία.

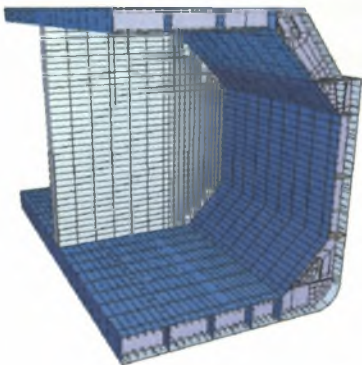
Ενώ στα συγκολλητά σωληνωτά μέλη η θεωρία του *Hot Spot Stress* έχει διαδοθεί αρκετά, στα συγκολλητά μεταλλικά επίπεδα ελάσματα χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό τους έναντι κόπωσης κυρίως η μέθοδος του *Classification* (*DnV-RP-C203*, *BS 7608*, *API RP 2A*). Παράδειγμα της κατηγοριοποίησης που υπάρχει στο *DnV-RP-C203* για συγκολλητά ελάσματα σε φυσικό περιβάλλον φαίνεται στον Πίνακα 2.3.1. Τελευταία όμως γίνεται προσπάθεια να εφαρμοστεί η θεωρία *Hot Spot Stress* για το σχεδιασμό έναντι κόπωσης και σε συγκολλητά μεταλλικά επίπεδα ελάσματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πλωτών πλατφορμών (βλ. σχήμα 2.3.1) άντλησης και αποθήκευσης καυσίμων υλών, τα

Ανασκόπηση Κανονισμών για τον Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης

γνωστά FPSO’s (Floating Production Storage and Off-loading) καθώς και σε δεξαμενόπλοια. Ο σχεδιασμός αυτών των κατασκευών έναντι κόπωσης περιγράφεται στο DnV-RP-C206.

Detail category	Constructional details	Description	Requirement
C1	<div>3. </div> <div>4. </div>	<div>3. Automatic fillet or butt welds carried out from both sides but containing stop-start positions.</div> <div>4. Automatic butt welds made from one side only, with a backing bar, but without start-stop positions.</div>	<div>4.:</div> <div>- When the detail contains start-stop positions use category C2</div>
C2		<div>5. Manual fillet or butt welds.</div> <div>6. Manual or automatic butt welds carried out from one side only, particularly for box girders</div>	<div>6.:</div> <div>- A very good fit between the flange and web plates is essential. Prepare the web edge such that the root face is adequate for the achievement of regular root penetration with out brake-out.</div>
C2		<div>7. Repaired automatic or manual fillet or butt welds</div>	<div>7.:</div> <div>- Improvement methods that are adequately verified may restore the original category.</div>

Πίνακας 2.3.1. Κατηγοριοποίηση συνδέσεων μεταλλικών ελασμάτων για την επιλογή της κατάλληλης καμπύλης S-N (DnV-RP-C203).



Σχήμα 2.3.1. Συνγκολλητά μεταλλικά ελάσματα σε πλατφόρμα άντλησης και αποθήκευσης καυσίμων υλών προσομοιωμένα με πεπερασμένα στοιχεία(DnV-RP-C206).

Ανασκόπηση Κανονισμών για τον Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης

Με βάση τα παραπάνω η μέθοδος του *Hot Spot Stress* είναι η πιο τεκμηριωμένη και πιο ακριβής καθώς προχωράει πιο πέρα από τον απλό υπολογισμό της ονομαστικής τάσης, σε δύσκολες και σύνθετες γεωμετρίες, ενώ προϋποθέτει την επιλογή μίας μόνο καμπύλης η οποία είναι ανεξάρτητη της γεωμετρίας. Με την πρόοδο που έχουν σημειώσει πλέον οι αριθμητικές μέθοδοι (όπως η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων), είναι εύκολο να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια η συγκέντρωση των τάσεων στην κρίσιμη περιοχή και να επιτευχθεί ο προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής της τάσης η οποία θα μας οδηγήσει στο να προσδιορίσουμε το συνολικό χρόνο ζωής της κατασκευής, μέσα στον οποίο μπορεί να δεχτεί μία συγκεκριμένη επαναληπτική φόρτιση.

2.4 Ανασκόπηση Υπαρχόντων Κανονισμών για Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης

Μερικοί από τους κανονισμούς που αναφέρονται στο σχεδιασμό έναντι κόπωσης και χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι ακόλουθοι:

- *DnV Recommended Practice RP-C203* “Fatigue Design of Offshore Steel Structures” – August 2005.
- *BSI*. Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures. *BS 7608*: 1993 (with amendments AMD 8337, 15th February 1995).
- *Eurocode 3*: Design of Steel Structures – Part 1.9: General Rules and Rules for Buildings. prEN 1993-1-9, May 2003.
- *API*. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API RP2A LRFD (20th Edition, July 1993) & LRFD (1st Edition, July 1993).
- *IIW*. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW document XIII 1965r14-03/XV-1127r14-03, July 2006.

2.4.1 DnV Recommended Practice RP-C203

Ο DnV RP-C203 αναφέρεται στο σχεδιασμό κατασκευών έναντι κόπωσης για χάλυβες σε μη έντονα διαβρωτικό περιβάλλον με τάση διαρροής μικρότερη των 960 MPa και για χάλυβες σε θαλάσσιο περιβάλλον, εξασφαλισμένους έναντι της διάβρωσης με τάση διαρροής έως τα 550 MPa. Στον DnV RP-C203 χρησιμοποιούνται και οι δύο γνωστοί μέθοδοι σχεδιασμού έναντι κόπωσης (*Hot Spot Stress & Classification Method*) επίπεδων ελασμάτων και σωληνωτών συνδέσεων. Για τον προσδιορισμό της εναπομείνουσας ζωής του μέλους της κατασκευής χρησιμοποιείται ο γνωστός νόμος των Palmgren – Miner όπου λαμβάνεται υπ' όψη η ιστορία σε κόπωση του μέλους της κατασκευής (στις διάφορες επαναλαμβανόμενες φορτίσεις):

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^n n_i \cdot (\Delta\sigma_i)^m \leq \eta$$

όπου, D , η συνολική επιρροή της κόπωσης στην κατασκευή, a το σημείο τομής της S-N καμπύλης με τον άξονα των κύκλων ζωής σε λογαριθμική κλίμακα, m η κλίση της καμπύλης S-N σε διάγραμμα με λογαριθμικούς άξονες, k το σύνολο των διαφορετικών επαναληπτικών φορτίσεων που επιβάλλονται στην κατασκευή, n_i ο αριθμός των επιβαλλόμενων κύκλων για τη δεδομένη φόρτιση, N_i οι αναμενόμενοι κύκλοι ζωής για δεδομένος εύρος τάσεων, $\Delta\sigma$, και η ο συντελεστής ασφαλούς λειτουργίας της κατασκευής ο οποίος προκύπτει από πίνακες ανάλογα με τη σπουδαιότητα της κατασκευής.

Στο σχεδιασμό με την ονομαστική τάση, ο οποίος αναφέρεται σε επίπεδα μεταλλικά ελάσματα ο σχεδιαστής επιλέγει ανάλογα με τη γεωμετρία του στοιχείου, το υλικό και τον τύπο της συγκόλλησης την καμπύλη S-N και έχοντας υπ' όψη του τον κατάλληλο συντελεστή SCF μπορεί να προσδιορίσει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που δύναται να φέρει με ασφάλεια η κατασκευή. Οι καμπύλες S-N περιγράφονται από εξίσωση της μορφής:

$$\log N = \log a - m \log \Delta\sigma$$

Στην παραπάνω εξίσωση γίνεται να ληφθεί υπόψη και η επιρροή του πάχους του ελάσματος.

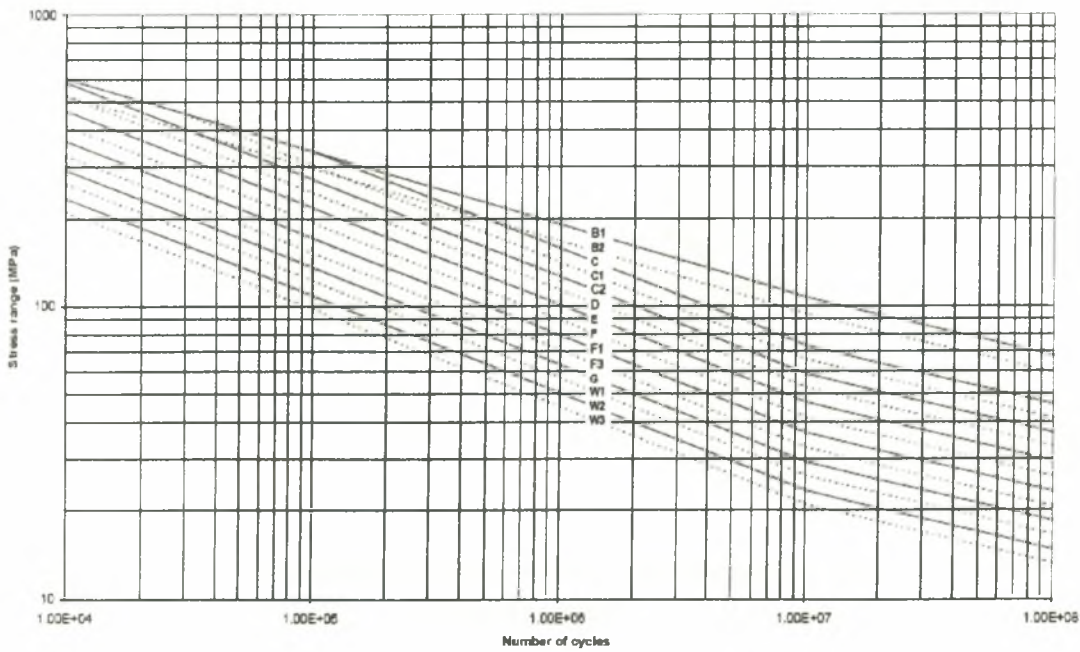
Ανασκόπηση Κανονισμών για τον Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης

Στον Πίνακα 2.4.1 φαίνονται οι τιμές της κλίσης της ευθείας S-N καθώς και η τιμή $\log a$ για τις διάφορες περιπτώσεις στοιχείων κατασκευής που υπάρχουν στον *DnV RP-C203* για σχεδιασμό σε μη έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Στο σχήμα 2.4.1 περιλαμβάνονται οι αντίστοιχες καμπύλες S-N.

Table 2-1 S-N curves in air						
S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles $\log \bar{a}_1$ $m_2 = 5.0$	Fatigue limit at 10^7 cycles *)	Thickness exponent k	Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

*) see also section 2.10

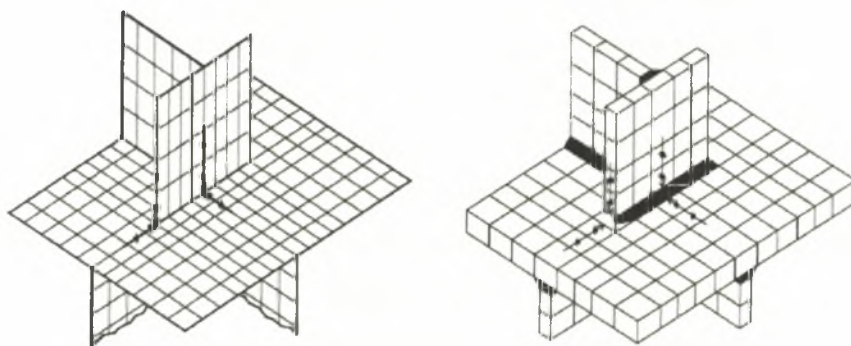
Πίνακας 2.4.1. Κατηγοριοποίηση τυπικών στοιχείων κατασκευής όπου δίνονται οι συντελεστές m και $\log a$ (Μέθοδος Classification).



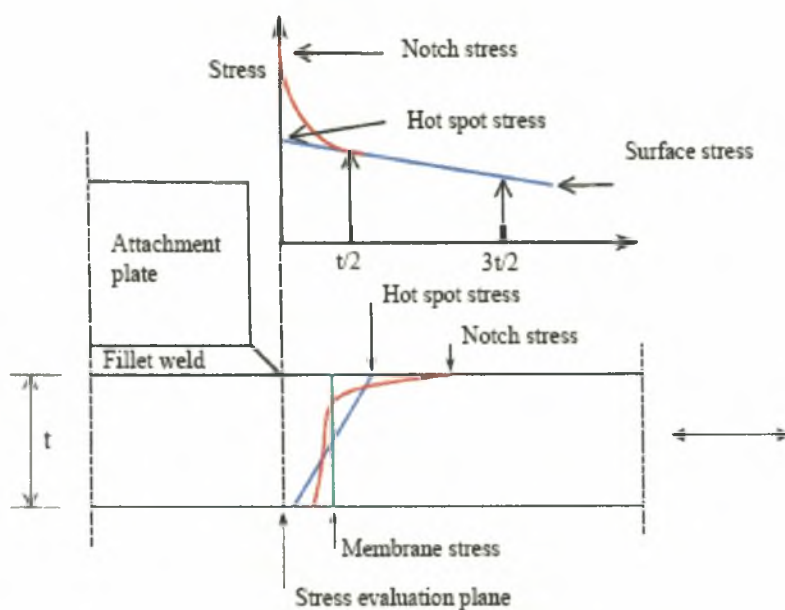
Σχήμα 2.4.1. Καμπύλες σχεδιασμού S-N για τυπικά στοιχεία κατασκευών.

Στον κανονισμό *DnV RP-C203* περιέχονται παραμετρικές σχέσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών SCF. Με δεδομένη τη γεωμετρία υπολογίζονται οι συντελεστές SCF με τους οποίους πολλαπλασιάζεται η ονομαστική τάση. Οι παραμετρικές σχέσεις είναι προτεινόμενες ενώ για πιο σύνθετες περιπτώσεις ενδείκνυται ο αναλυτικός προσδιορισμός αυτών των συντελεστών.

Για τη μέθοδο του *Hot Spot Stress* σε επίπεδα μεταλλικά ελάσματα ο *DnV RP-C203* προτείνει τον ακριβή υπολογισμό της τάσης στο κρίσιμο σημείο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τον υπολογισμό της τάσης χρησιμοποιούνται αριθμητικά μοντέλα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (2D shell elements) καθώς και πεπερασμένα στοιχεία τριών (3) διαστάσεων (3D solid elements), των οποίων η πυκνότητα (κοντά στην κρίσιμη περιοχή) καθορίζεται ανάλογα με το μέγεθος και τη γεωμετρία του στοιχείου (βλ. σχήμα 2.4.2). Ο υπολογισμός της τάσης στο κρίσιμο σημείο γίνεται με γραμμική παρεμβολή έχοντας γνωστές τις τάσεις στα σημεία με απόσταση 0.5t και 1.5t (βλ. σχήμα 2.4.3) από το κρίσιμο σημείο καθώς η τάση που υπολογίζεται ακριβώς στο κρίσιμο σημείο συνήθως απειρίζεται αν στην περιοχή δεν υπάρχει μία μικρή καμπυλότητα συναρμογής των συγκολλημένων στοιχείων. Επίσης η κρίσιμη τάση μπορεί να ληφθεί από το σημείο με απόσταση 0.5t πολλαπλασιασμένη με 1.12. Στον κανονισμό αναφέρονται επίσης τρόποι εκτίμησης της τάσης στο κρίσιμο σημείο για στοιχεία κατασκευής τα οποία παρουσιάζουν δυσκολίες στην ακριβή προσομοίωσή τους αλλά και για περιπτώσεις με πυκνότητα πεπερασμένων στοιχείων μικρότερη από την προτεινόμενη λόγω υπερβολικού υπολογιστικού κόστους.



Σχήμα 2.4.2. Αριθμητικά μοντέλα επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε 2 και 3 διαστάσεις.



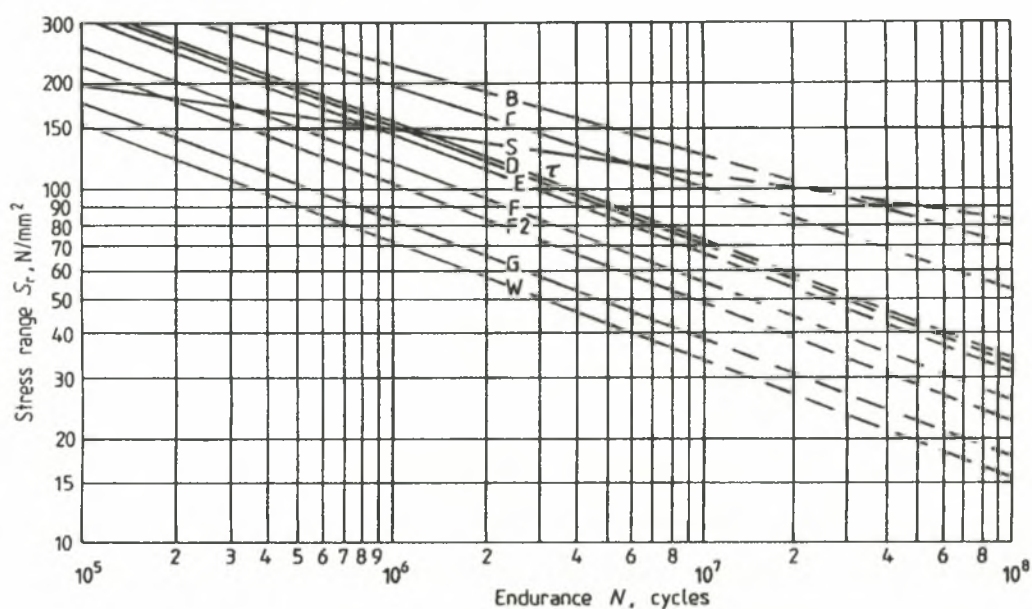
Σχήμα 2.4.3. Μέθοδος υπολογισμού τάσης στο κρίσιμο σημείο.

2.4.2 British Standard 7608

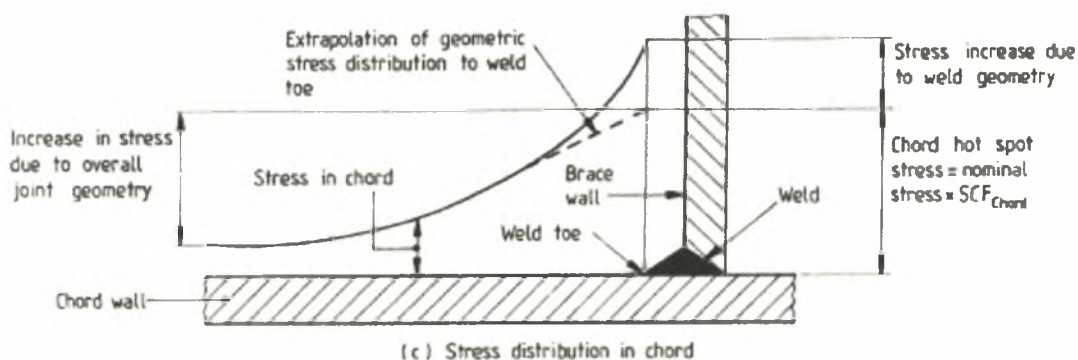
Ο BS7608 (1993) αναφέρεται κυρίως σε μεταλλικές κατασκευές που υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες, μη σταθερού εύρους φορτίσεις σε κανονικά εναέρια περιβάλλοντα και όχι σε έντονα διαβρωτικά όπως τα υποθαλάσσια. Για το σχεδιασμό σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα χωρίς προστασία χρησιμοποιούνται μειωτικοί συντελεστές. Ο χρησιμοποιούμενος χάλυβας στις κατασκευές πρέπει να έχει τάση διαρροής μικρότερη των 700 MPa. Στον BS7608 για τον σχεδιασμό έναντι κόπωσης γίνεται η χρήση της ονομαστικής τάσης συνδυασμένης με τους κατάλληλους συντελεστές *SCF*. Δεδομένης της τελικής τάσης ο μελετητής ανατρέχει στην καμπύλη σχεδιασμού S-N (βλ. σχήμα 2.4.4) που αφορά το στοιχείο της κατασκευής που σχεδιάζει και υπολογίζει τον λειτουργικό χρόνο ζωής. Για στοιχεία που υπόκεινται σε διάφορες φορτίσεις κατά τη διάρκεια της ζωής τους, μη σταθερού εύρους χρησιμοποιείται και εδώ ο νόμος Palmgren – Miner, ενώ υπάρχει και πρόβλεψη για την επιρροή του πάχους του στοιχείου. Τα παραπάνω ισχύουν όμως για την περίπτωση που το στοιχείο της κατασκευής το οποίο σχεδιάζεται έχει κατηγοριοποιηθεί και υπάρχει η σχετική καμπύλη σχεδιασμού. Στην περίπτωση όμως που το στοιχείο της κατασκευής δεν έχει κατηγοριοποιηθεί και δεν υπάρχει καμπύλη σχεδιασμού που να είναι αρκετά «κοντά» στο πρόβλημα προτείνεται ο ακριβής υπολογισμός της τάσης με τη μέθοδο πεπερασμένων

Ανασκόπηση Κανονισμών για τον Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης

στοιχείων και εξαγωγή της κρίσιμης τάσης με γραμμική παρεμβολή (βλ. σχήμα 2.4.5). Στον BS7608 δεν προτείνεται με λεπτομέρεια ο τρόπος προσομοίωσης ενώ για τη μέθοδο *Hot Spot Stress* δίνεται έμφαση περισσότερο στο σχεδιασμό των σωληνωτών συγκολλημένων μελών και καθόλου στο σχεδιασμό των επίπεδων συγκολλητών ελασμάτων. Τελικά, για τον σχεδιασμό επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων έναντι κόπωσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά η μέθοδος *Classification* ενώ για το σχεδιασμό των σωληνωτών μεταλλικών μελών προτείνεται η μέθοδος του *Classification* για τις περιπτώσεις που έχουν προβλεφθεί διαφορετικά χρησιμοποιείται η μέθοδος *Hot Spot Stress*.



Σχήμα 2.4.4. Καμπύλες σχεδιασμού για κατηγοριοποιημένα στοιχεία κατασκευών (BS 7608).



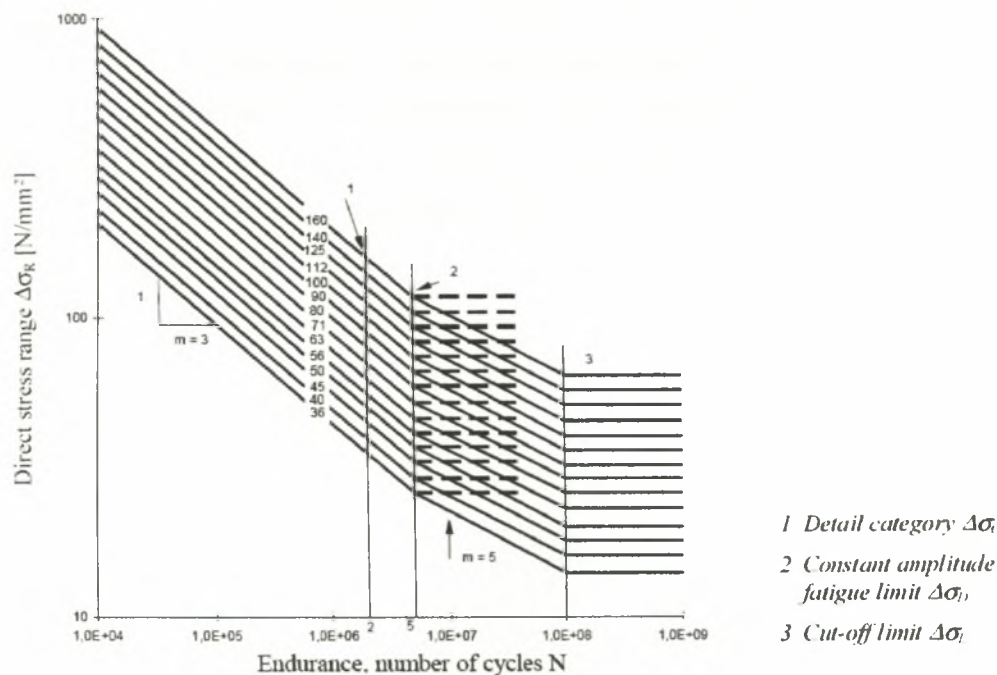
Σχήμα 2.4.5. Υπολογισμός τάσης στο κρίσιμο σημείο (BS 7608).

2.4.3 Eurocode 3 (Part 1.9 General Rules and Rules for Buildings. Fatigue)

Ο *Eurocode 3 (Part 1.9)* είναι ένας κανονισμός που ασχολείται με το σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών σε συνθήκες οριακής αστοχίας αλλά σε κατάσταση λειτουργίας. Για τον σχεδιασμό των κατασκευών προτείνονται ειδικοί συντελεστές προσαύξησης των επιβαλλόμενων φορτίων σχεδιασμού και ειδικοί συντελεστές απομείωσης των υπολογισμένων αντοχών των στοιχείων της κατασκευής. Πρόκειται για κανονισμό που ασχολείται κυρίως με κατασκευές σε ηπειρωτικά εδάφη, σε εναέριες και συνήθη διαβρωτικές περιοχές και όχι για κατασκευές στη θάλασσα, για αυτό και δεν υπάρχει πρόβλεψη ειδικά για το σχεδιασμό offshore κατασκευών.

Ο σχεδιασμός έναντι κόπωσης γίνεται με τη χρήση της ονομαστικής τάσης, με συντελεστές προσαύξησης της και με καμπύλες σχεδιασμού οι οποίες ανταποκρίνονται σε συνήθη στοιχεία κατασκευών τα οποία και έχουν κατηγοριοποιηθεί (βλ. σχήμα 2.4.6). Οι τιμές που προκύπτουν από τις καμπύλες σχεδιασμού λαμβάνονται απομειωμένες ανάλογα με το είδος της φόρτισης (σταθερή ή μη) και το εύρος της φόρτισης, ενώ για τον υπολογισμό της λειτουργικής ζωής του στοιχείου που υπόκειται σε διαφορετικές φορτίσεις χρησιμοποιείται ο νόμος Palmgren – Miner. Στις τιμές των καμπύλων σχεδιασμού γίνεται να ληφθεί υπό όψη και η επιρροή του πάχους του στοιχείου.

Για τις περιπτώσεις μη κατηγοριοποιημένων στοιχείων ο *Eurocode 3* δεν προτείνει αναλυτικά κάποια μέθοδο υπολογισμού για την ακριβή τάση στο κρίσιμο σημείο ή κάποιο αναλυτικό προσομοίωμα για την προσέγγιση της, αλλά περιέχει μία σειρά μειωτικών συντελεστών της τελικής αντοχής που προκύπτει και των συντελεστών επαύξησης των τάσεων που υπολογίζονται από την επίλυση της κατασκευής.



Σχήμα 2.4.6. Καμπύλες σχεδιασμού για κατηγοριοποιημένα στοιχεία κατασκευών.

2.4.4 API RP2A LRFD

Ο *API RP2A LRFD* είναι ένας σχετικά νέος κανονισμός ο οποίος καλύπτει την περιοχή του σχεδιασμού πλωτών πλατφορμών άντλησης και αποθήκευσης καυσίμων υλών (βλ. σχήματα 2.4.7 και 2.4.8). Οι περισσότερες κατασκευές με τις οποίες ασχολείται ο *API RP2A LRFD* βρίσκονται ή εδράζονται σε βάθος όχι μεγαλύτερο των 300 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο κανονισμός χρησιμοποιεί τη φιλοσοφία σχεδιασμού των αυξημένων δράσεων και των μειωμένων αντοχών όπως και άλλοι κανονισμοί σχεδιασμού κατασκευών (*Eurocode 3*).

Στον *API RP2A LRFD* γίνεται ο διαχωρισμός για τις μεθόδους σχεδιασμού των συγκολλημένων ελασμάτων και των συγκολλημένων σωληνωτών μελών. Για τα μεν πρώτα χρησιμοποιείται η *Classification Method* ενώ για τα δεύτερα χρησιμοποιείται η *Hot Spot Method*. Για το σχεδιασμό στοιχείων σε συνδυασμένη φόρτιση προτείνεται η χρήση του νόμου Palmgren – Miner για τον υπολογισμό του τελικού χρόνου ζωής έναντι κόπωσης.

Ο σχεδιασμός έναντι κόπωσης γίνεται με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από την επίλυση της κατασκευής για τα επιθυμητά φορτία τα οποία προσανέξονται με τους συντελεστές *SCF*. Στη συνέχεια αφού υπολογιστούν οι τάσεις στα κρίσιμα σημεία προσδιορίζεται ο τελικός χρόνος ζωής με τη χρήση καμπύλων σχεδιασμού.

Ανασκόπηση Κανονισμών για τον Σχεδιασμό έναντι Κόπωσης

Για τον σχεδιασμό των σωληνωτών συγκολλημένων μελών στις κατασκευές περιγράφεται ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των χρησιμοποιούμενων *SCF* με βάση στοιχεία της γεωμετρίας τους. Η περίπτωση των επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων καλύπτεται μερικώς καθώς ο συγκεκριμένος κανονισμός καλύπτει κυρίως το σχεδιασμό των σωληνωτών μεταλλικών μελών.



Σχήμα 2.4.7. Τυπική κατασκευή για την άντληση και αποθήκευση καύσιμων υλών.

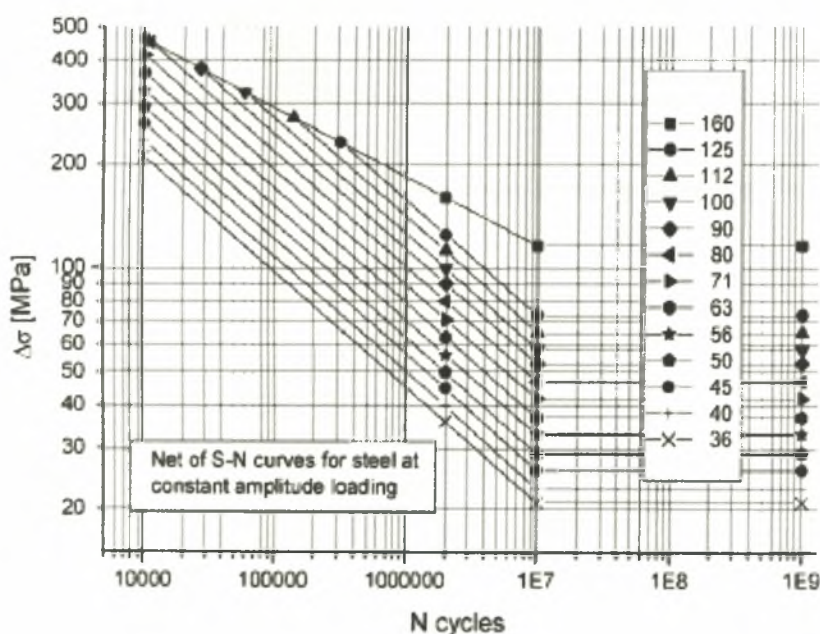


Σχήμα 2.4.8. Κατασκευή για την έδραση πλατφόρμας άντλησης καυσίμων όπου φαίνονται τα σωληνωτά μέλη της κατασκευής τα οποία καλύπτει ο API RP2A LRFD.

2.4.5 IIW Recommendations

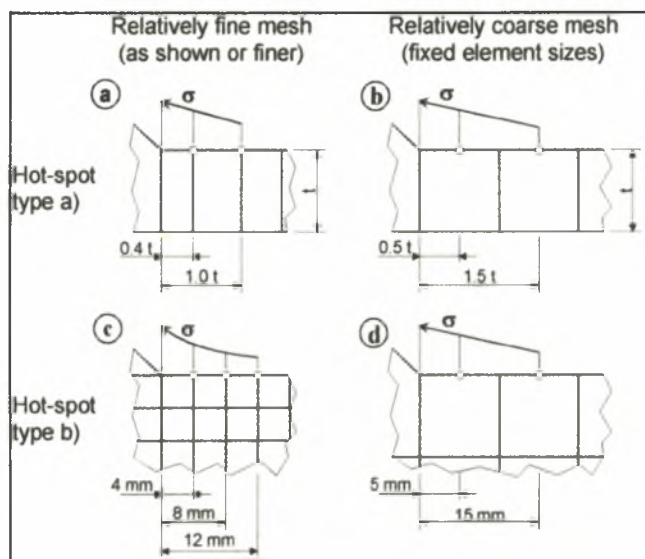
Ο *IIW Recommendations* δεν αποτελεί από μόνος του κάποιον κανονισμό αλλά πρόκειται για οδηγίες για σχεδιασμό έναντι κόπωσης συγκολλητών μεταλλικών συνδέσεων και μεμονωμένων συγκολλητών στοιχείων κατασκευής. Οι οδηγίες αφορούν τις κατασκευές όπου χρησιμοποιείται χάλυβας με τάση διαρροής μέχρι 960 MPa σε συνήθη περιβάλλοντα (όχι έντονα) και εκτεθειμένα σε συνήθεις θερμοκρασίες. Για τον υπολογισμό των τελικών αντοχών αλλά και για τα χρησιμοποιούμενα εντατικά μεγέθη, για το σχεδιασμό, προβλέπεται η χρήση συντελεστών ασφαλείας.

Η προσέγγιση των οδηγιών είναι περίπου η ίδια με άλλους κανονισμούς. Ακολουθείται η *Classification Method* για συνήθεις περιπτώσεις οι οποίες έχουν προηγουμένως κατηγοριοποιηθεί, ενώ για τις μη κατηγοριοποιημένες γίνεται η χρήση της ονομαστικής τάσης συνδυασμένης με τους κατάλληλους συντελεστές *SCF*. Στις προτεινόμενες καμπύλες σχεδιασμού (βλ. σχήμα 2.4.9) γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ συνεχόμενων και σταθερών φορτίσεων και μεταβαλλόμενων. Για τον τελικό υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση χρησιμοποιείται ο αθροιστικός νόμος Palmgren – Miner. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι για περιπτώσεις συνεχόμενων φορτίσεων σταθερού εύρους, για τις οποίες δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα ή δεδομένα κατάστασης λειτουργίας από παρόμοιες κατασκευές, πρέπει να λαμβάνεται ο μισός χρόνος ζωής από τον τελικά υπολογιζόμενο από τις καμπύλες σχεδιασμού.



Σχήμα 2.4.9. Προτεινόμενες καμπύλες σχεδιασμού *IIW Recommendations*.

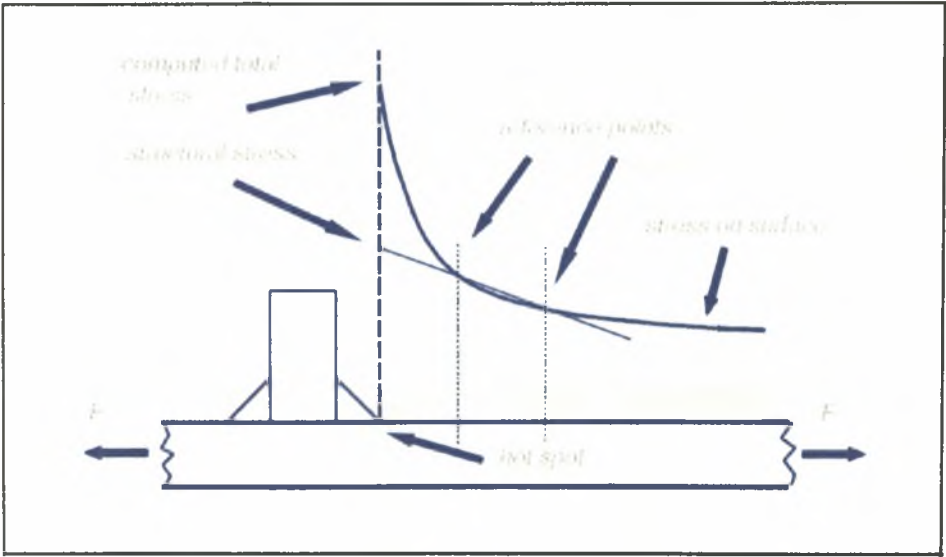
Για τις περιπτώσεις που δεν περιλαμβάνονται στις οδηγίες προτείνεται ο αναλυτικός υπολογισμός των τάσεων στα κρίσιμα σημεία με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για τις οποίες προβλέπονται αναλυτικές πληροφορίες για τη προσομοίωση των προβλημάτων, αλλά και τη χρήση των κατάλληλων εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις αναλύσεις. Συνολικά, η περιγραφόμενη διαδικασία θυμίζει αυτή που περιγράφεται στον *DnV RP-C203*. Προτείνεται η χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (2D) αλλά και τριών (3D) διαστάσεων. Ορίζεται η περιοχή που περιγράφεται ως *Hot Spot Stress* και ανάλογα με την πυκνότητα των στοιχείων που χρησιμοποιούνται (βλ. πίνακα 2.4.2), δίδονται τα σημεία (βλ. σχήμα 2.4.10) υπολογισμού των τάσεων με βάση τα οποία γίνεται γραμμική παρεμβολή και υπολογίζεται η τιμή της τάσης στη ρίζα της συγκόλλησης (βλ. σχήμα 2.4.11) όπου λόγω γεωμετρίας υπάρχει συγκέντρωση τάσεων.



Σχήμα 2.4.10. Σημεία υπολογισμού των τάσεων κοντά στο κρίσιμο σημείο.

Type of model and weld toe		Relatively coarse models		Relatively fine models	
		Type a	Type b	Type a	Type b
Element size	Shell s	$t \times t$ $\max t \times w/2^{*)}$	10 x 10 mm	$\leq 0.4 t \times t$ or $\leq 0.4 t \times w/2$	$\leq 4 \times 4$ mm
	Solid s	$t \times t$ $\max t \times w$	10 x 10 mm	$\leq 0.4 t \times t$ or $\leq 0.4 t \times w/2$	$\leq 4 \times 4$ mm
Extrapolation points	Shell s	0.5 t and 1.5 t mid-side points ^{**)}	5 and 15 mm mid-side points	0.4 t and 1.0 t nodal points	4, 8 and 12 mm nodal points
	Solid s	0.5 and 1.5 t surface center	5 and 15 mm surface center	0.4 t and 1.0 t nodal points	4, 8 and 12 mm nodal points
^{*)} w = longitudinal attachment thickness + 2 weld leg lengths ^{**)} surface center at transverse welds, if the weld below the plate is not modelled (see left part of fig. 2.2-11)					

Πίνακας 2.4.2. Σημεία υπολογισμού των τάσεων κοντά στο κρίσιμο σημείο ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του προβλήματος.



Σχήμα 2.4.11. Περιγραφή του Hot Spot και της Extrapolation Method.

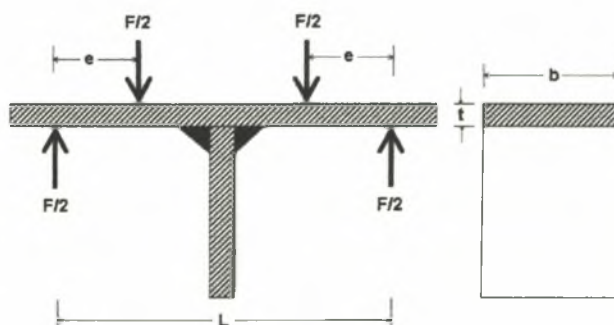
Κεφάλαιο 3

3.1 Σκοπός των πειραμάτων

Για να προσδιοριστεί ο χρόνος ζωής μέχρι την αστοχία και να κατανοηθεί η συμπεριφορά σε κόπωση των συγκολλημένων μεταλλικών πλακών από χάλυβα υψηλής αντοχής εκτελέστηκαν συνολικά εννέα (9) δοκιμές στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν να προσδιοριστεί το διάγραμμα της επιβαλλόμενης ονομαστικής τάσης συναρτήσει του αντίστοιχου αριθμού κύκλων φόρτισης (S-N curve) που επιφέρει αστοχία δοκιμών συγκολλημένων πλακών σε μορφή T όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς για το σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών και συγκολλήσεων έναντι κόπωσης.

3.2 Εργαστηριακές δοκιμές και δοκίμια

Τα δοκίμια αποτελούνται από δύο (2) μεταλλικές πλάκες οι οποίες έχουν συγκολληθεί σε μορφή T (T-Joint welded plates). Όλα τα δοκίμια είχαν τις ίδιες διαστάσεις και κατασκευάστηκαν από τον ίδιο μητρικό χάλυβα. Η φόρτιση των δοκιμών πραγματοποιείται με κάμψη τεσσάρων (4) σημείων με άνοιγμα, $L=235\text{ mm}$, πάχος, $t=15\text{ mm}$, πλάτος, $b=95\text{ mm}$ και μοχλοβραχίονα επιβολής των συγκεντρωμένων φορτίων, $e=70\text{ mm}$ (βλ. Σχήμα 3.2.1).



Σχήμα 3.2.1. Διαστάσεις δοκιμών για δοκιμή κάμψης τεσσάρων (4) σημείων.

Εργαστηριακές Δοκιμές

Τα δοκίμια των συγκολλημένων πλακών δοκιμάστηκαν σε συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης με σταθερό εύρος επιβαλλόμενης τάσης. Με βάση το επιθυμητό εύρος της επιβαλλόμενης ονομαστικής τάσης στα δοκίμια κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών, για να προσομοιωθεί το φαινόμενο της κόπωσης, και με δεδομένο το δείκτη του εύρους της ελάχιστης από τη μέγιστη τάση, $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$, ο οποίος είχε τιμή 0.5 έγινε ο υπολογισμός των φορτίων που έπρεπε να επιβληθούν στα δοκίμια. Η συχνότητα επιβολής του ελάχιστου και του μέγιστου φορτίου επιλέχθηκε ίση με 5 Hz. Το εύρος της επιβαλλόμενης ονομαστικής τάσης, $\Delta\sigma$, στα δοκίμια ήταν 260, 220, 200, 180, 160 και 120 MPa. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων για τις δοκιμές με εύρος επιβαλλόμενης ονομαστικής τάσης, $\Delta\sigma$, 260, 200 και 160 MPa χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) δοκίμια. Στον Πίνακα 3.2.1 περιλαμβάνεται η τιμή του εύρους της ονομαστικής τάσης επιβολής στις δοκιμές κόπωσης και τα υπολογισμένα φορτία που αντιστοιχούν σε αυτές τις τάσεις.

Πίνακας 3.2.1. Εύρος ονομαστικής τάσης και αντίστοιχα φορτία επιβολής στα δοκίμια.

$\Delta\sigma$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	F_{max} (kN)	F_{mean} (kN)	F_{min} (kN)
260	520	260	52.9	39.7	26.5
220	440	220	44.8	33.6	22.4
200	400	200	40.7	30.5	20.4
180	360	180	36.6	27.5	18.3
160	320	160	32.6	24.4	16.3
120	240	120	24.4	18.3	12.2

3.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Οι δοκιμές κόπωσης των συγκολλημένων μεταλλικών πλακών πραγματοποιήθηκαν σε ένα μεταλλικό άκαμπτο πλαίσιο μήκους 3 m, πλάτους 3 m και ύψους 4 m που φέρει σέρβο - υδραυλικό ενεργοποιητή φορτίου/μετακίνησης της MTS με δυνατότητα επιβολής φορτίου έως 250 kN και μετακίνησης ± 75 mm. Ο χειρισμός του εμβόλου έγινε με τη βοήθεια ψηφιακής κονσόλας της MTS η οποία συνδέεται με αυτόματο καταγραφικό σύστημα των μετρήσεων στις δοκιμές (βλ. Σχ. 3.3.1). Οι δοκιμές έγιναν με έλεγχο του επιβαλλόμενου συγκεντρωμένου φορτίου, F. Για τον προσδιορισμό της τιμής της μέγιστης υποχώρησης στο άνοιγμα του δοκιμίου τοποθετήθηκε μηχανοσκόπετρο τύπου DCDT το οποίο είχε στερεωθεί κατάλληλα πάνω στο άκαμπτο πλαίσιο των δοκιμών (βλ. Σχ. 3.3.2).

Τα μηκυνσιόμετρα αυτού του τύπου αποτελούνται από μία μεταλλική ράβδο με δυνατότητα μετακίνησης εντός ενός πηνίου. Η ολισθαίνουσα ράβδος στερεώνεται στο δοκίμιο (με τη βοήθεια μεταλλικού ελάσματος) και κατά τη μετακίνησή της εντός του πηνίου δημιουργεί μεταβολή στην επαγωγική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του μηκυνσιομέτρου το οποίο τροφοδοτείται συνεχώς με ρεύμα σταθερής τάσης. Η μεταβολή αυτή στην τάση που μετριέται στην έξοδο του μηκυνσιομέτρου καταγράφεται και αφού έχει προηγηθεί βαθμονόμηση του οργάνου μετατρέπεται στην αντίστοιχη μετακίνηση.

Εκτός από τη μέτρηση της τιμής της μέγιστης υποχώρησης στα δοκίμια των συγκολλημένων μεταλλικών πλακών, που αποτελεί σαφή ένδειξη για την κατάσταση της δυσκαμψίας του δοκιμίου κατά τη διάρκεια των δοκιμών κόπωσης, μετρήθηκαν και οι ανηγμένες αξονικές παραμορφώσεις σε κρίσιμες θέσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου με τη χρήση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων που είχαν επικολληθεί κατάλληλα (βλ. Σχ. 3.3.3).

Τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα είναι λεπτά μεταλλικά κυκλώματα δεδομένης αντίστασης που επικολλώνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου. Όταν το δοκίμιο υποστεί μία καταπόνηση, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται μεταφέρονται στο κύκλωμα και προκαλούν λόγω της μεταβολής του μήκους του, αλλαγή στην αντίστασή του. Η αλλαγή της αντίστασης είναι ανάλογη των παραμορφώσεων που δημιουργεί η εξωτερική φόρτιση και ο συντελεστής αναλογίας είναι χαρακτηριστικός του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του μεταλλικού κυκλώματος του ηλεκτρομηκυνσιομέτρου.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η αλλαγή της αντίστασης του μηκυνσιόμετρου συνδέεται ως αντίσταση σε μία γέφυρα Wheatstone. Με τη βοήθεια της ισορροπίας της γέφυρας μπορούμε και ανιχνεύουμε μικρές αλλαγές αντίστασης και επομένως τις παραμορφώσεις του δοκιμίου. Η ευαισθησία των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων είναι δυνατόν να φτάσει μέχρι και το ένα εκατομμυριοστό σε ανηγμένη παραμόρφωση (10^{-6} mm/mm). Η αλλαγές που καταγράφονται στην αντίσταση των μηκυνσιομέτρων μετατρέπονται με ειδικούς συντελεστές σε καθαρή ανηγμένη παραμόρφωση.

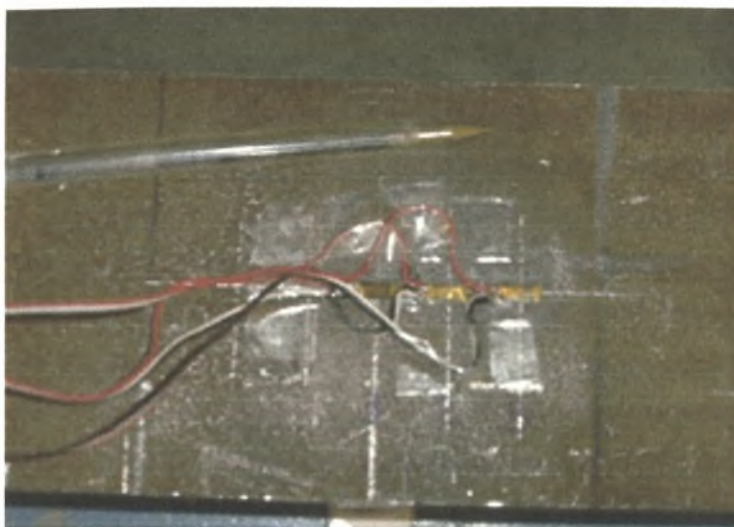
Για την εξασφάλιση της ακρίβειας της τιμής του επαναλαμβανόμενου συγκεντρωμένου φορτίου καθώς και της συχνότητας επιβολής του χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος που κατέγραφε το σήμα εξόδου της ψηφιακής κονσόλας, με την οποία γινόταν ο χειρισμός του κατακόρυφου εμβόλου επιβολής του φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο επιβεβαιωνόταν η ορθή εφαρμογή των επιθυμητών φορτίων και κατά επέκταση των επιβαλλόμενων τάσεων στα δοκίμια.



Σχήμα 3.3.1. Ενεργοποιητής φορτίου και πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης τεσσάρων (4) σημείων με επαναλαμβανόμενη φόρτιση.



Σχήμα 3.3.2. Θέση μηχανοσκόπευτρον τύπου DCDT που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του μέγιστου βέλους κάμψης στα δοκίμια.



Σχήμα 3.3.3. Επικόλληση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων για τη μέτρηση των ανηγμένων αξονικών παραμορφώσεων.

3.4 Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης

Σε κάθε δοκιμή μετά το πέρας ενός ορισμένου αριθμού κύκλων φόρτισης γίνεται η καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου και του μέγιστου βέλους κάμψης του δοκιμίου για δύο (2) συνεχείς κύκλους φόρτισης: $0 \rightarrow \sigma_{\max} \rightarrow 0$, για να προσδιοριστεί η επιρροή του μηχανισμού της κόπωσης στη συνολική δυσκαμψία του δοκιμίου. Με αυτό τον τρόπο έγινε μία προσπάθεια προσδιορισμού της μεταβολής του ρυθμού απόκρισης των δοκιμών όσο ο μηχανισμός της κόπωσης επέφερε αλλαγές στην δομή του υλικού και οδηγούσε στην αστοχία. Κατά την αστοχία τα δοκίμια αδυνατούν να φέρουν το μέγιστο φορτίο που έχει καθοριστεί, με τις παραμορφώσεις να αυξάνονται σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό. Το χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς των δοκιμών είναι ότι η σημαντική μεταβολή του ρυθμού απόκρισης (ταχεία αύξηση του μήκους της ρωγμής) και κατά επέκταση της δυσκαμψίας των δοκιμών, επέρχεται όταν βρισκόμαστε πολύ κοντά στον αριθμό κύκλων φόρτισης, αστοχίας των δοκιμών. Η αστοχία των δοκιμών προέρχεται από άνοιγμα ρωγμής, παράλληλης με τη συγκόλληση η οποία συνεχίζεται κατά μήκος και είναι εμφανής και στις δύο (2) παρειές του δοκιμίου (βλ. εικόνες 3.4.1, 3.4.2 και 3.4.3). Η προώθηση της ρωγμής γίνεται αρκετά γρήγορα κατά τη διάρκεια των δύο (2) τελευταίων κύκλων φόρτισης κατά τους οποίους το δοκίμιο τελικά αστοχεί. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης για τα δοκίμια που εξετάστηκαν (Σχ. 3.4.1-3.4.9) καθώς και το σχηματικό γράφημα επιβολής του φορτίου σε κάθε δοκιμή (Σχ. 3.4.1-3.4.6).



Σχήμα 3.4.1. Χαρακτηριστική ρωγμή που οδηγεί στην τελική αστοχία του δοκιμίου.

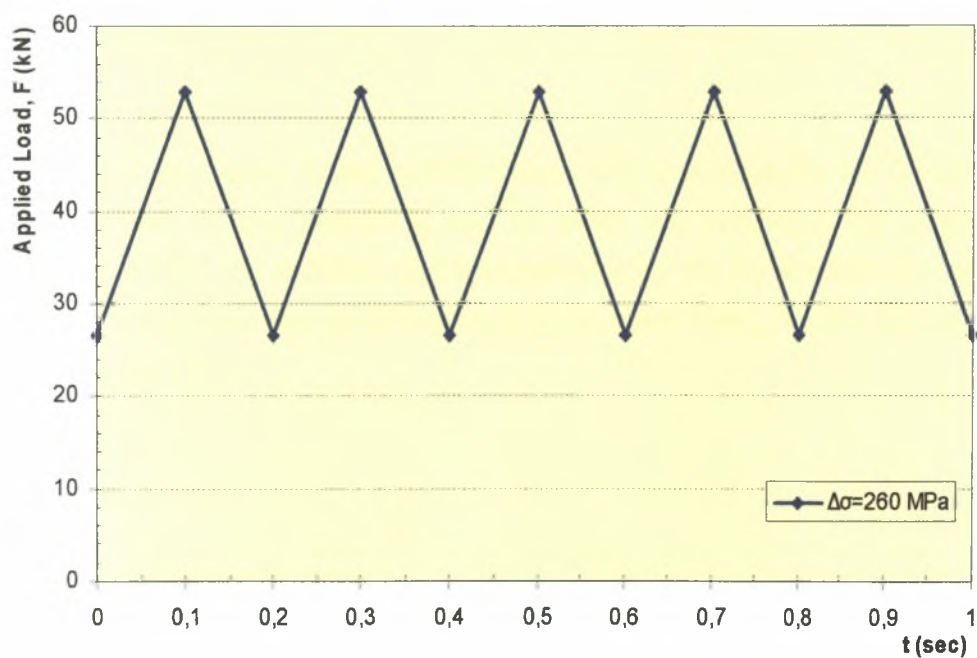


Σχήμα 3.4.2. Χαρακτηριστική ρωγμή που ξεκίνησε στη ρίζα της συγκόλλησης (κάτω σημείο διεπιφάνειας συγκόλλησης και μητρικού χάλυβα) παράλληλη με τη συγκόλληση.

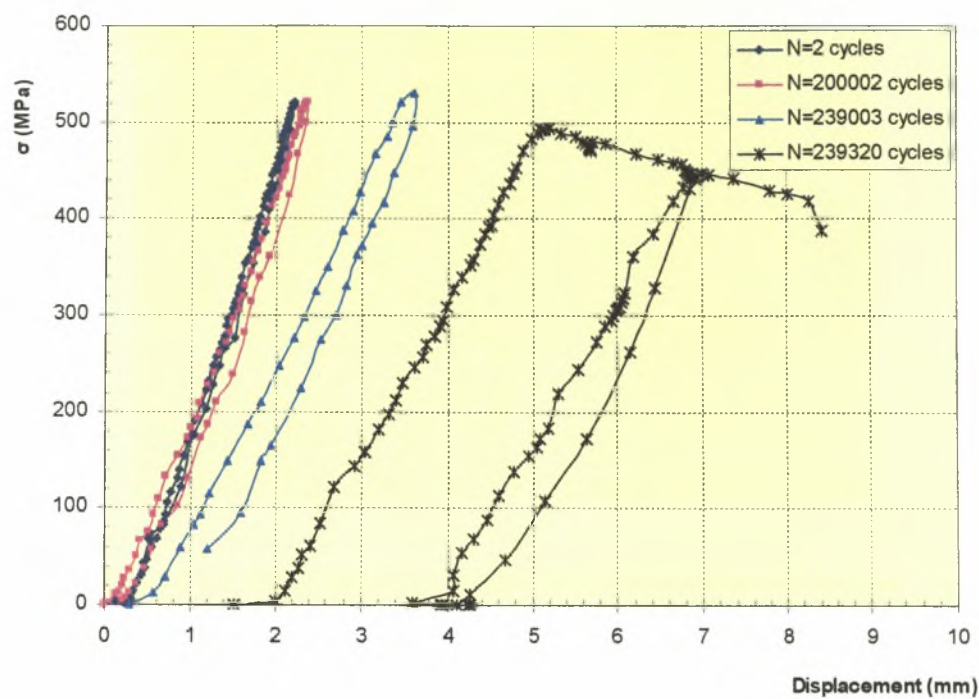


Σχήμα 3.4.3. Ανάπτυξη της ρωγμής κατά πλάτος της μεταλλικής πλάκας η οποία γίνεται εμφανής και στις δύο (2) παρειές.

3.4.1 $\Delta\sigma=260 \text{ MPa}$ (1)

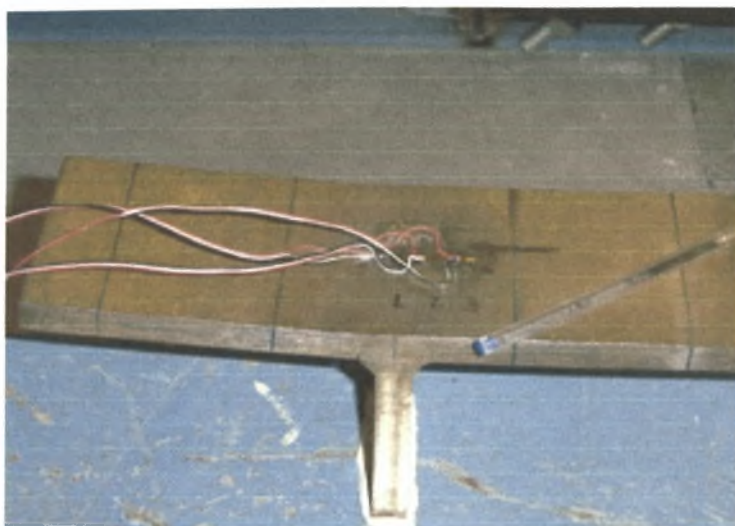


Σχήμα 3.4.1. Τρόπος επιβολής φορτίου για το δοκίμιο με $\Delta\sigma=260 \text{ MPa}$.



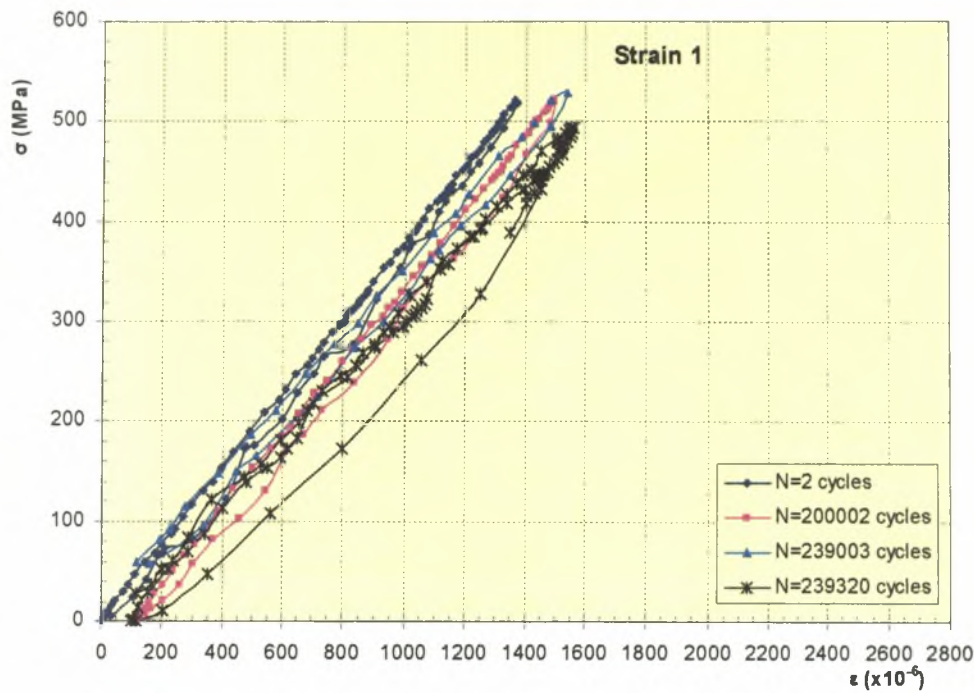
Σχήμα 3.4.1. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο με $\Delta\sigma= 260 \text{ MPa}$ (1).

Στη συγκεκριμένη δοκιμή τοποθετήθηκαν στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου, ανά αποστάσεις των 15 mm ξεκινώντας από το μέσον του ανοίγματος της καμπτόμενης μεταλλικής πλάκας του δοκιμίου, ηλεκτρομηκυνσιόμετρα για την μέτρηση των αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης των δύο (2) μεταλλικών πλακών (βλ. Σχ. 3.4.1).

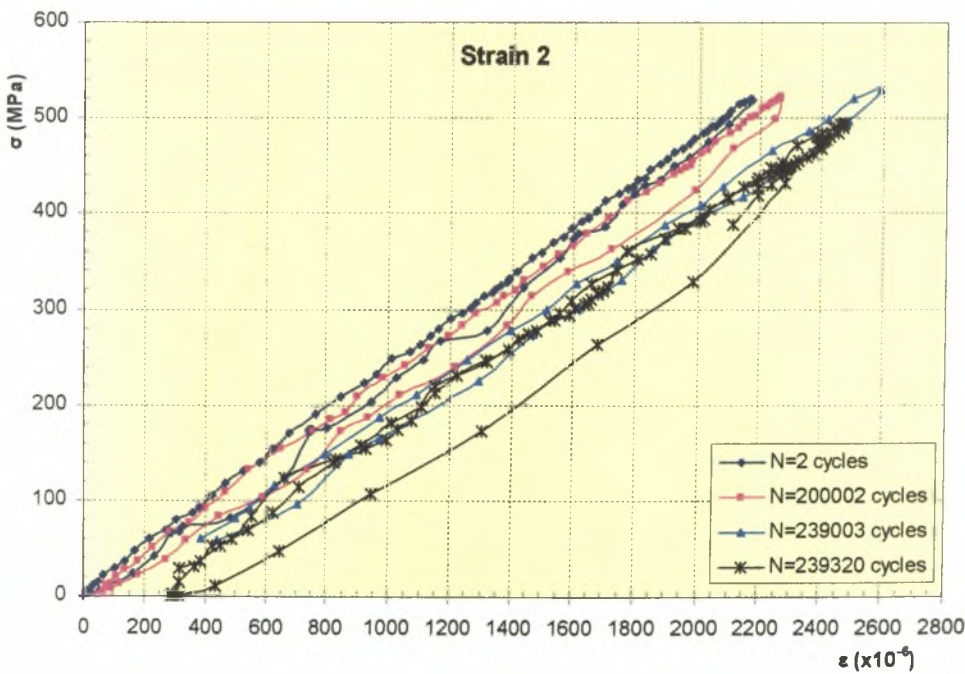


Σχήμα 3.4.1. Θέσεις των μηχανοσυνομέτρων στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου.

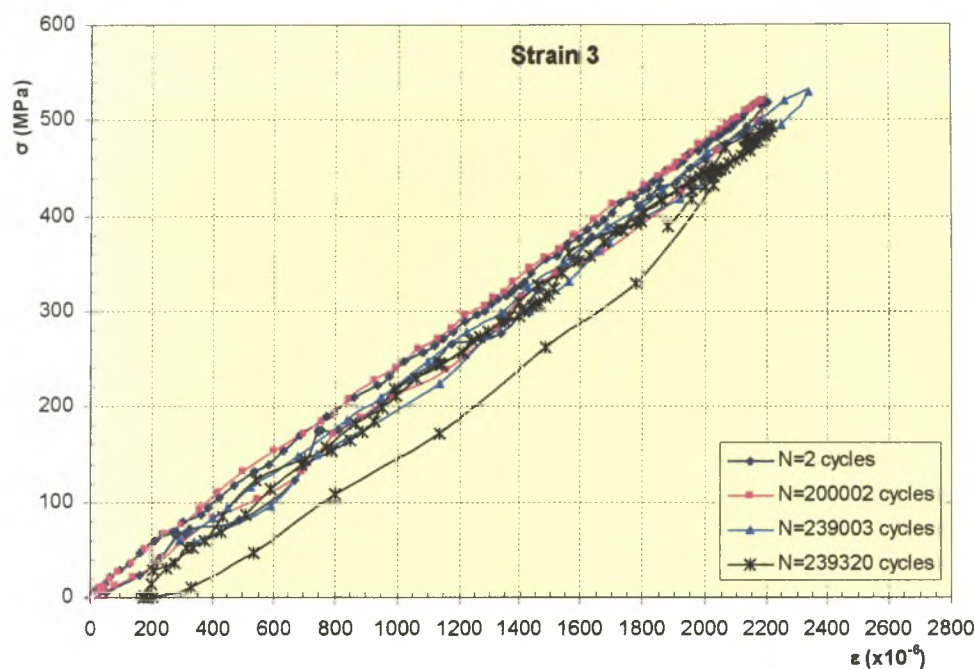
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων φαίνονται στα διαγράμματα τάσης – ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης τα οποία αριθμούνται με βάση τη θέση τους στην επιφάνεια του δοκιμίου όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.4.1.(διαγράμματα 3.4.10-3.4.12). Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης στην ελαστική περιοχή είναι μικρότερες στο μέσον (θέση 1) από ότι θα αναμέναμε. Στις θέσεις 2 και 3 οι τάσεις έχουν αναμενόμενες τιμές δεδομένης της δυσκαμψίας του δοκιμίου ενώ το μέτρο ελαστικότητας, E , του μητρικού υλικού από το οποίο προέρχεται το δοκίμιο των συγκολλημένων πλακών προκύπτει περίπου ίσο με 220 GPa. Τα γραφήματα εμφανίζονται γραμμικά ενδεικτικό του γεγονότος ότι η επιβολή του φορτίου γίνεται στην ελαστική περιοχή του υλικού και προς το τέλος του χρόνου ζωής του δοκιμίου οι παραμορφώσεις τείνουν να αυξάνονται. Οι μικρότερες τιμές των παραμορφώσεων ακριβώς στο μέσον του ανοίγματος οφείλονται στο ότι σε εκείνο το σημείο η συνολική δυσκαμψία του δοκιμίου λόγω της συγκολλημένης πλάκας στο κάτω μέρος του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από την εκτιμώμενη στο προσομοίωμα της δοκού με σταθερή διατομή καθ' όλο το μήκος.



Σχήμα 3.4.10. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης στη θέση 1.

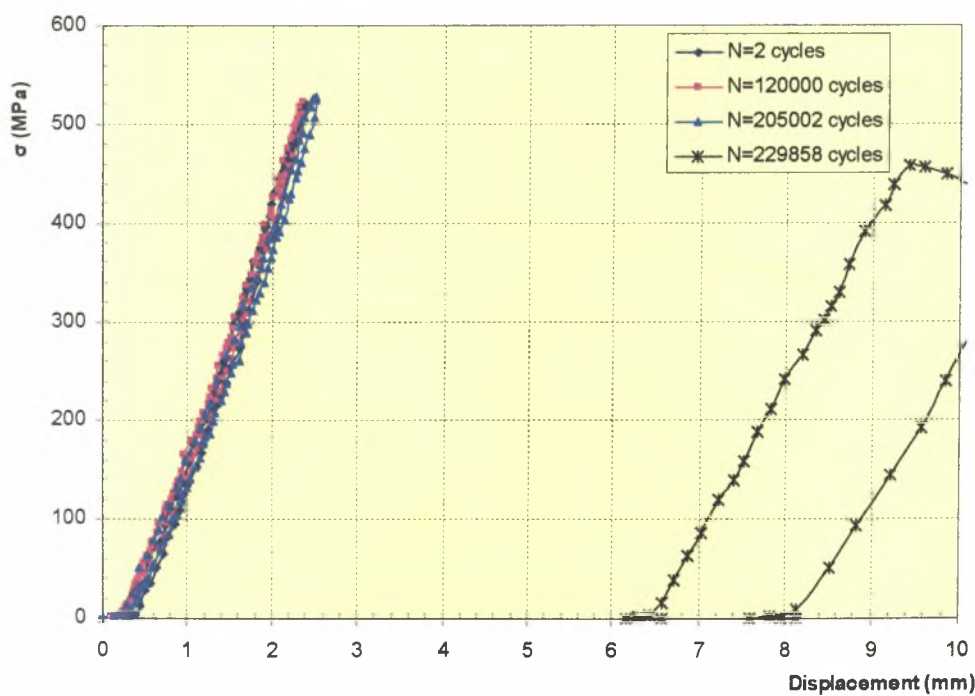


Σχήμα 3.4.11. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης στη θέση 2.



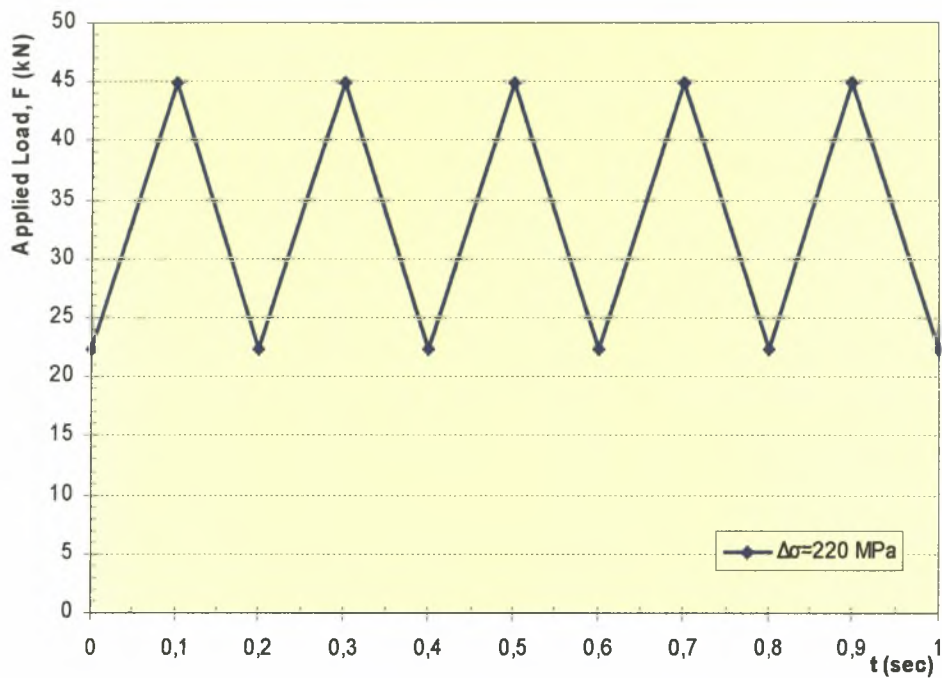
Σχήμα 3.4.12. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης στη θέση 3.

3.4.2 Δσ=260 MPa (2)

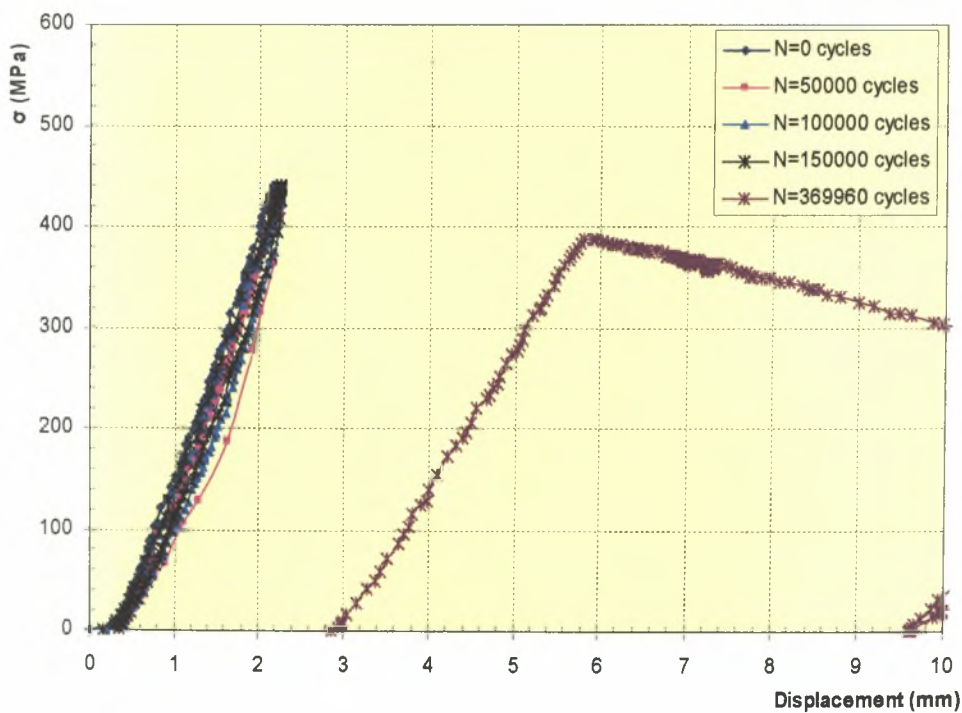


Σχήμα 3.4.2. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο Δσ=260 MPa (2).

3.4.3 Δσ=220 MPa

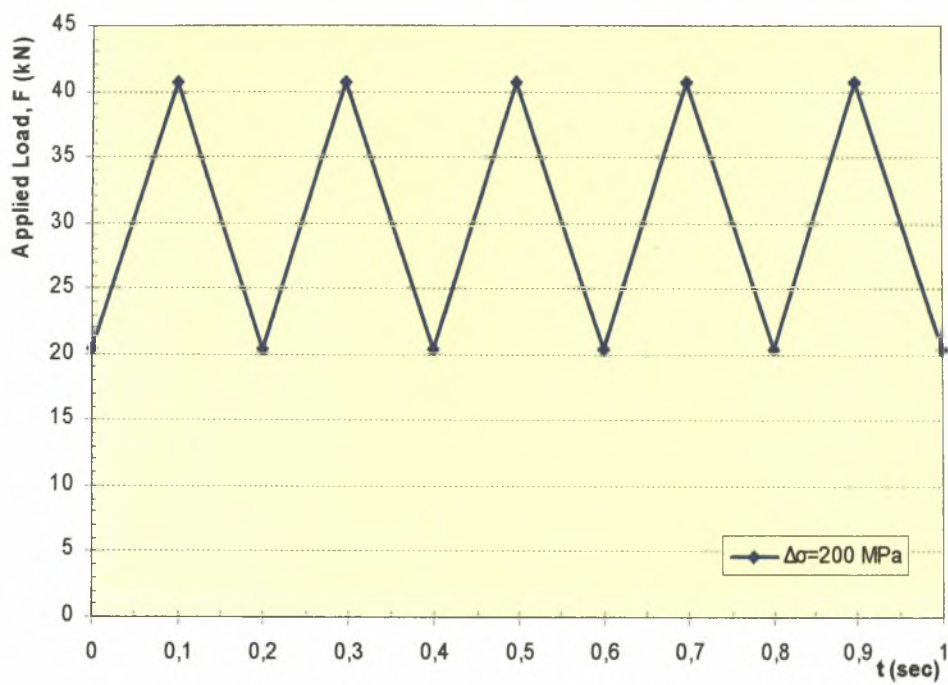


Σχήμα 3.4.2. Τρόπος επιβολής φορτίου για το δοκίμιο με Δσ=220 MPa.

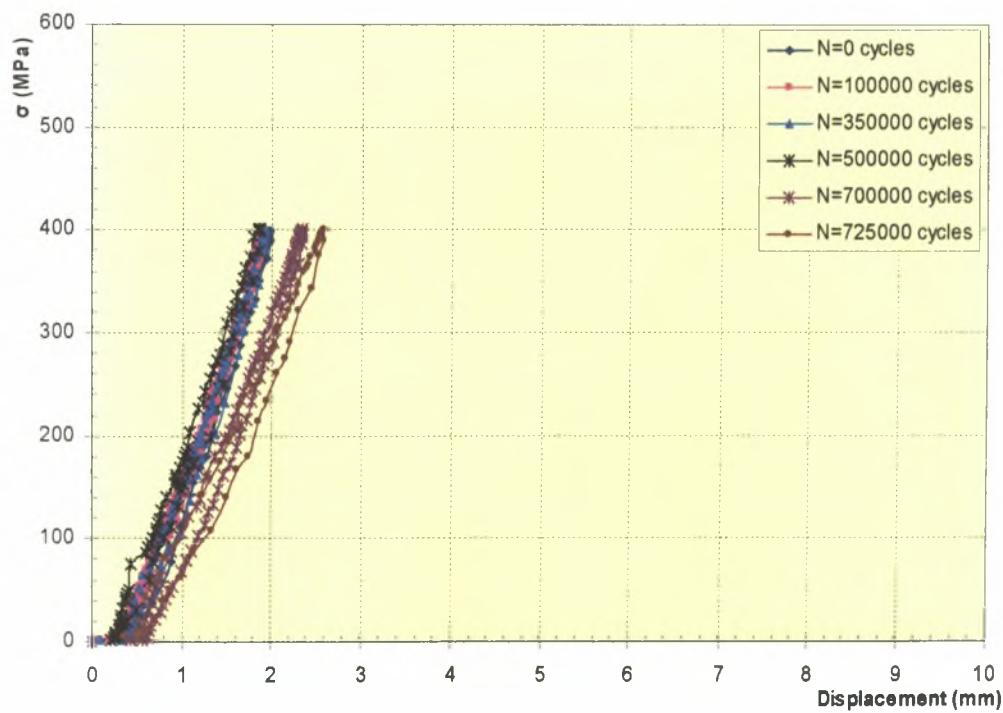


Σχήμα 3.4.3. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο Δσ=220 MPa.

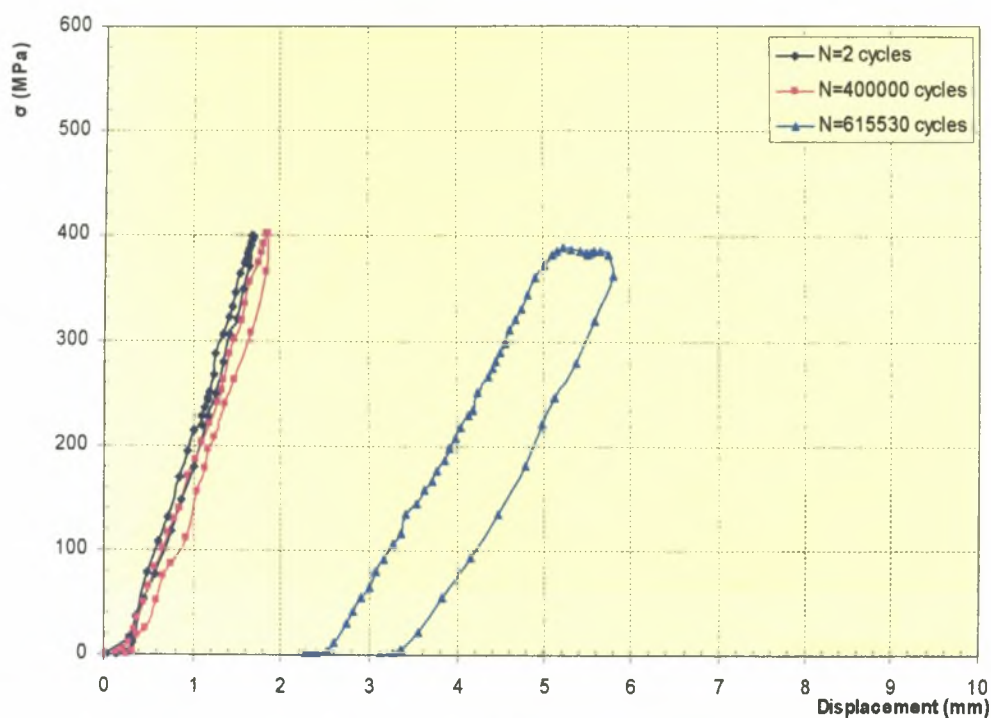
3.4.4 Δσ=200 MPa (1)



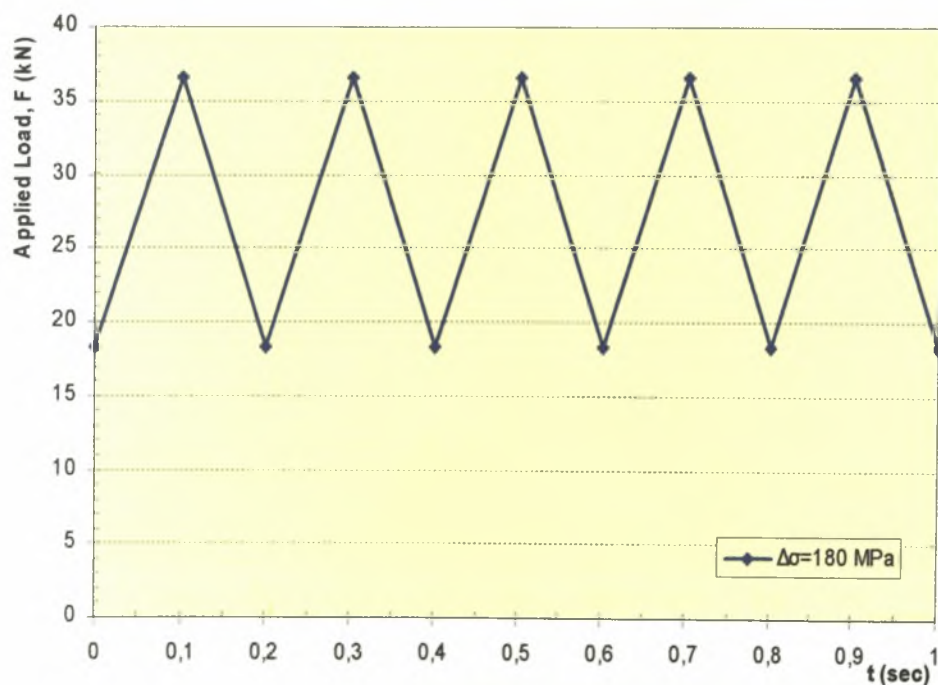
Σχήμα 3.4.3. Τρόπος επιβολής φορτίου για το δοκίμιο με Δσ=200 MPa.



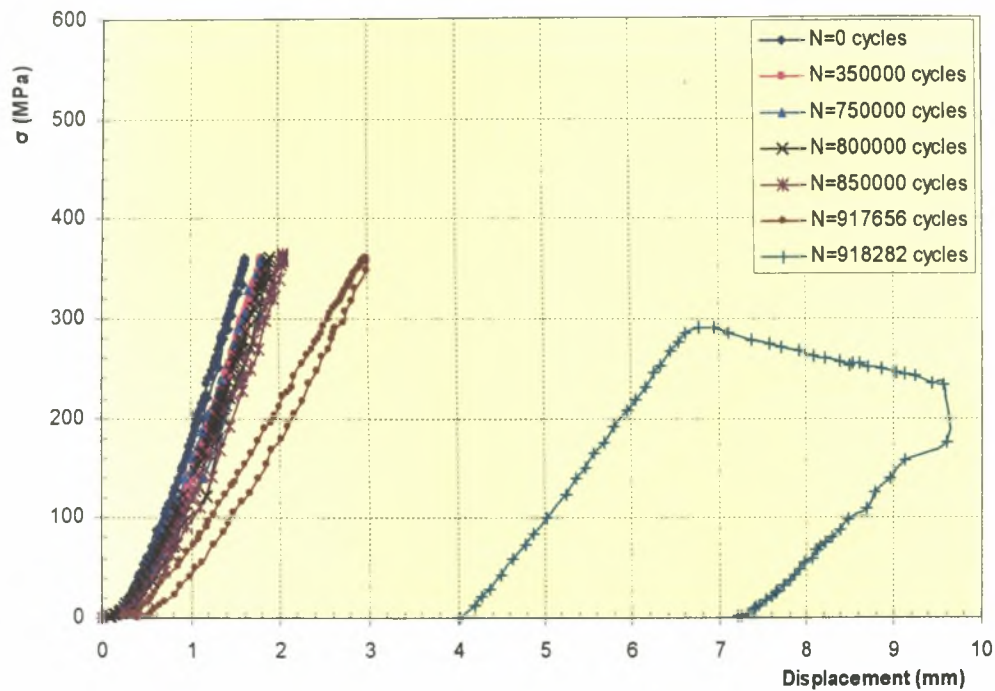
Σχήμα 3.4.4. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο Δσ=200 MPa (1).

3.4.5 $\Delta\sigma=200\text{ MPa}$ (2)

Σχήμα 3.4.5. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο $\Delta\sigma=200\text{ MPa}$ (2).

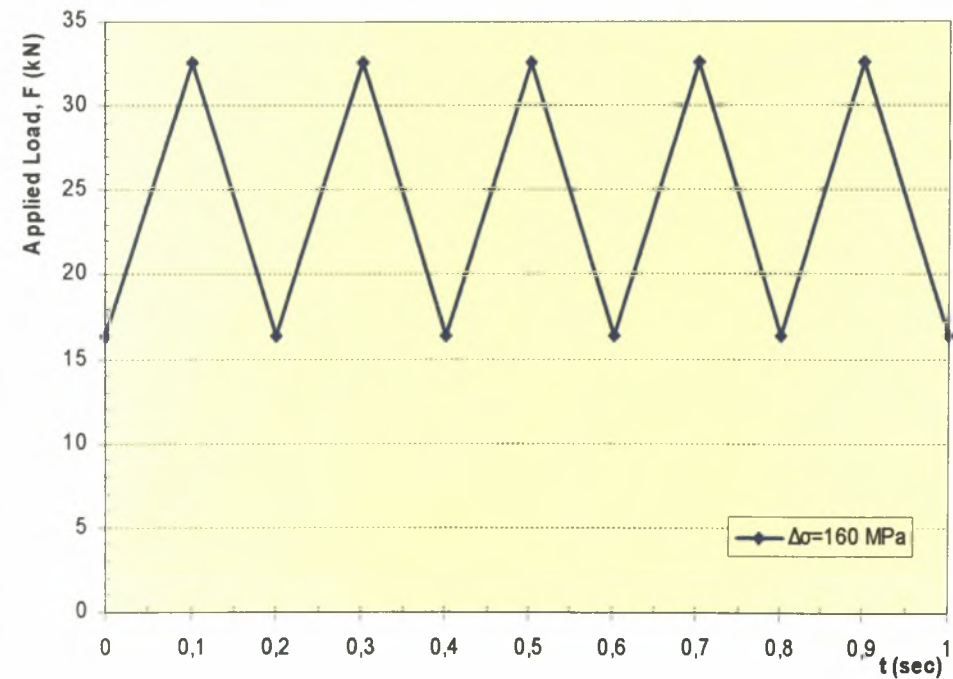
3.4.6 $\Delta\sigma=180\text{ MPa}$ 

Σχήμα 3.4.4. Τρόπος επιβολής φορτίου για το δοκίμιο με $\Delta\sigma=180\text{ MPa}$.

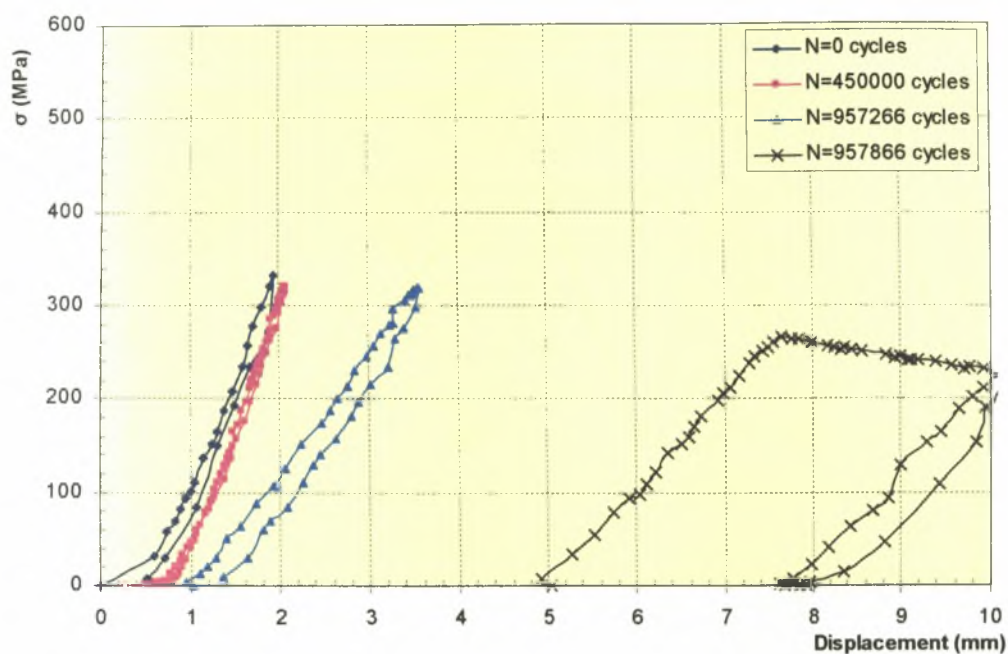


Σχήμα 3.4.6. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο $\Delta\sigma=180\text{ MPa}$.

3.4.7 $\Delta\sigma=160\text{ MPa}$ (1)

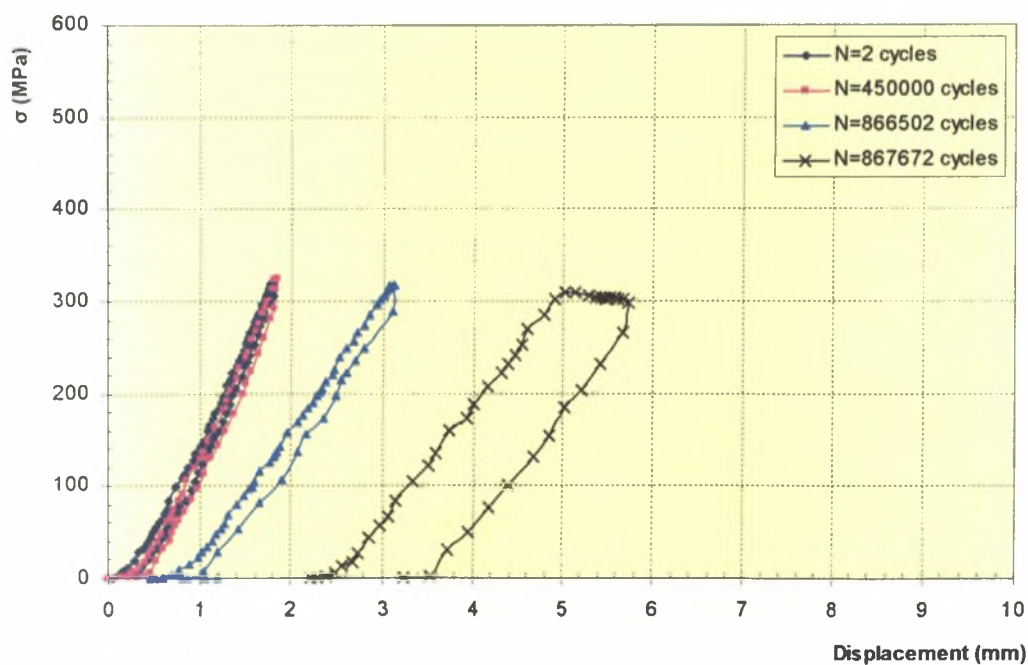


Σχήμα 3.4.5. Τρόπος επιβολής φορτίου για το δοκίμιο με $\Delta\sigma=160\text{ MPa}$.



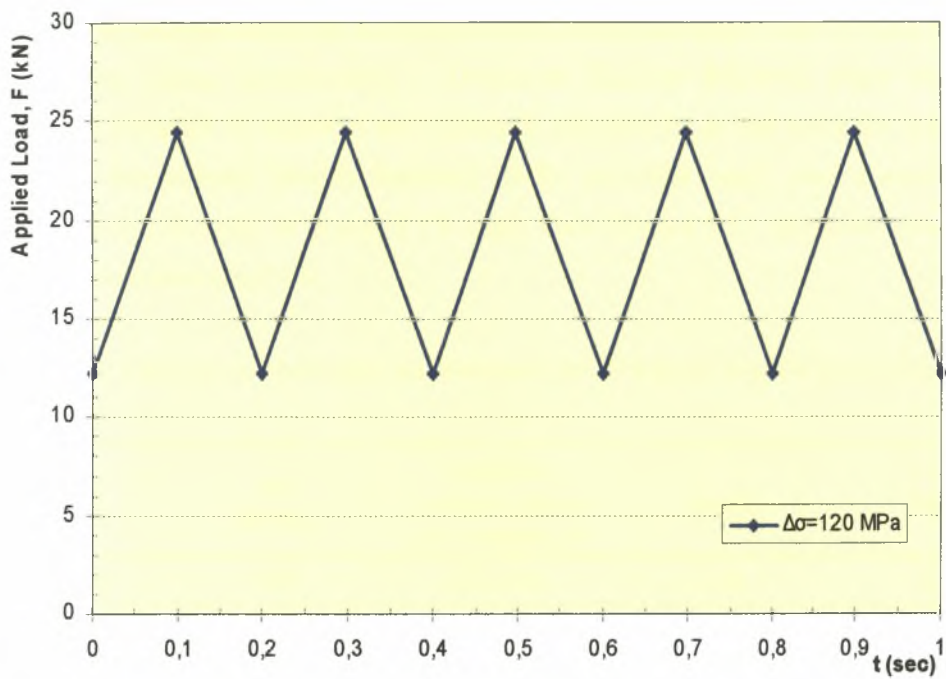
Σχήμα 3.4.7. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο $\Delta\sigma=160$ MPa (1).

3.4.8 $\Delta\sigma=160$ MPa (2)

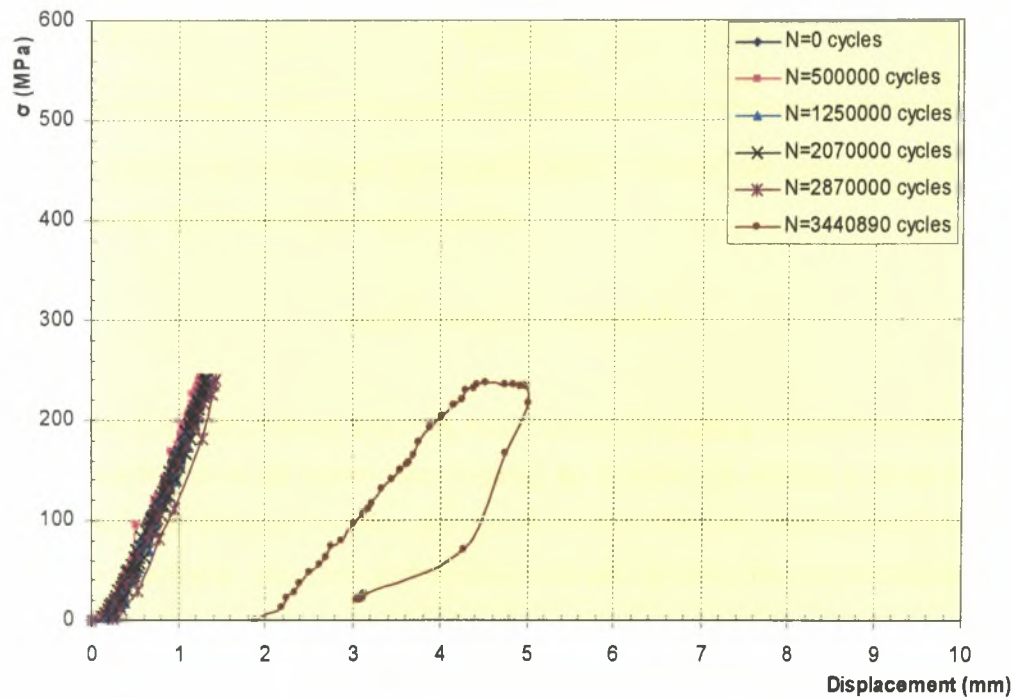


Σχήμα 3.4.8. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστου βέλους κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο $\Delta\sigma=160$ MPa (2)

3.4.9 Δσ=120 MPa



Σχήμα 3.4.6. Τρόπος επιβολής φορτίου για το δοκίμιο με Δσ=120 MPa.



Σχήμα 3.4.9. Διάγραμμα ονομαστικής τάσης – μέγιστον βέλος κάμψης στο άνοιγμα για το δοκίμιο Δσ=120 MPa.

3.5 Διάγραμμα Εύρους Ονομαστικής Τάσης & Συνολικών Κύκλων Φόρτισης (S–N)

Με τα αποτελέσματα των πειραμάτων όπως αυτά προέκυψαν έγινε δυνατή η χάραξη της καμπύλης Τάσης (ονομαστικής) – Συνολικών Κύκλων Φόρτισης μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου. Η καμπύλη που προέκυψε συγκρίνεται με την καμπύλη που δίνει ο Βρετανικός Κανονισμός (British Standard 7608) για fillet weld class F,συγκολλητών χαλύβων υψηλής αντοχής σε μορφή T (T-Joint). Στον Πίνακα 3.5.1 φαίνονται συνολικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Πίνακας 3.5.1. Εύρος ονομαστικής τάσης και συνολικοί κύκλοι ζωής των δοκιμίων με συχνότητα φόρτισης 5 Hz.

Κωδικός Δοκιμίου.	Δσ (MPa)	Αριθμός κύκλων μέχρι την αστοχία, N _f	logΔσ	logN _f
TFW_1 (1)	260	239,320	2.41	5.38
TFW_1 (2)	260	229,858	2.41	5.36
TFW_2 (1)	220	369,964	2.34	5.57
TFW_3 (1)	200	731,500	2.30	5.86
TFW_3 (2)	200	615,530	2.30	5.79
TFW_4 (1)	180	918,282	2.26	5.96
TFW_5 (1)	160	957,866	2.20	5.98
TFW_5 (2)	160	867,672	2.20	5.94
TFW_6 (1)	120	3,440,910	2.08	6.54

Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη τάσης – συνολικών κύκλων φόρτισης, S-N, σύμφωνα με τον Βρετανικό Κανονισμό είναι η

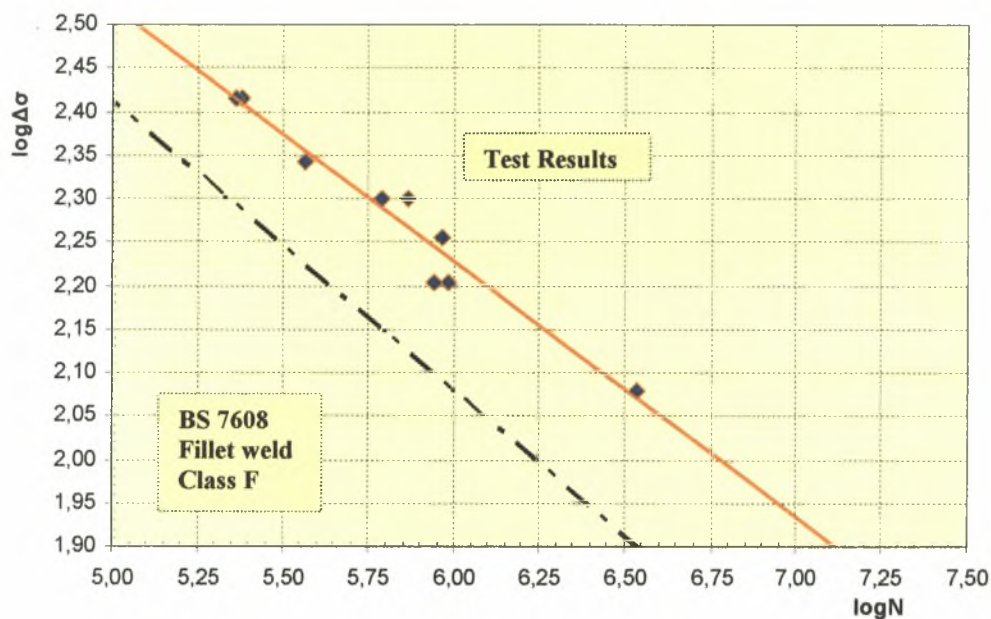
log N = log C₀ – m log Δσ

όπου N, είναι ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία, logC₀, σταθερά διαφορετική για κάθε κατηγορία υλικού και τύπου συγκόλλησης, m, η κλίση της ευθείας η οποία και αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του υλικού και του τύπου της συγκόλλησης και Δσ, το εύρος της ονομαστικής τάσης που αναπτύσσεται στο υπό εξέταση μέλος της κατασκευής.

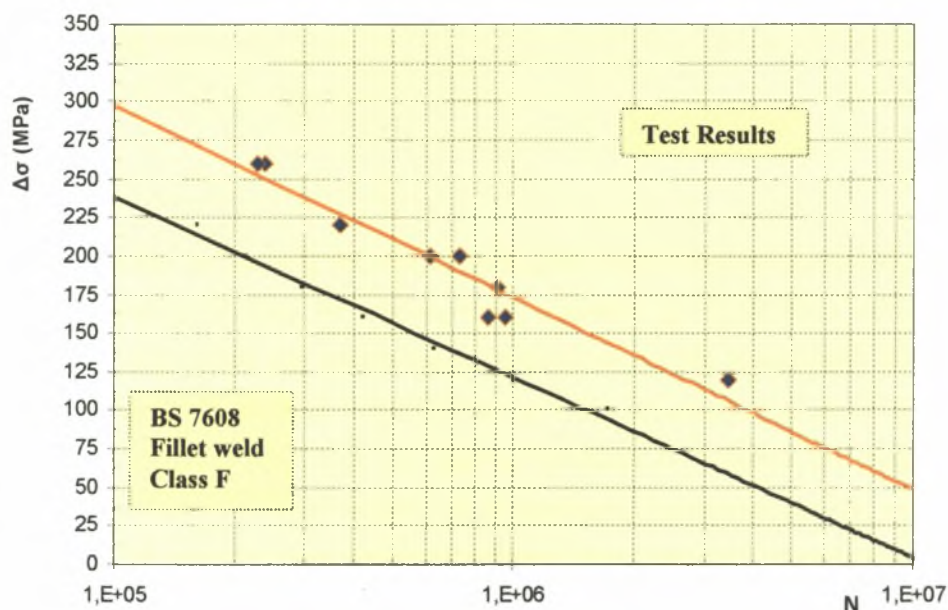
Από τις δοκιμές στο εργαστήριο η τιμή της κλίσης της ευθείας, m, προέκυψε ίση με -3.262 και ο συντελεστής logC₀ ίση με 13.256 ενώ ο BS 7608 δίνει -3.000 και 12.237, αντίστοιχα. Προκύπτουν δηλαδή συνολικά υψηλότερες αντοχές από αυτές που προκύπτουν με βάση τον BS 7608 για τον συγκεκριμένο τύπο συγκόλλησης και είδος χάλυβα. Το R² της προσαρμοσμένης στα πειραματικά αποτελέσματα ευθείας της παρούσης εργασίας είναι ίσο

Εργαστηριακές Δοκιμές

με 0.95, στοιχείο που αποδεικνύει ότι οι κύκλοι ζωής του υλικού (με το συγκεκριμένο τύπο συγκόλλησης) συνδέονται με την τάση με γραμμική σχέση. Στα γραφήματα που ακολουθούν φαίνεται το διάγραμμα S-N όπως προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές (Σχήματα 3.5.1-3.5.2).



Σχήμα 3.5.1. Διάγραμμα κόπωσης εύρους ονομαστικής τάσης συναρτήσει του συνολικού αριθμού κύκλων φόρτισης μέχρι αστοχία σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 3.5.2. Διάγραμμα κόπωσης εύρους ονομαστικής τάσης συναρτήσει του συνολικού αριθμού κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία.

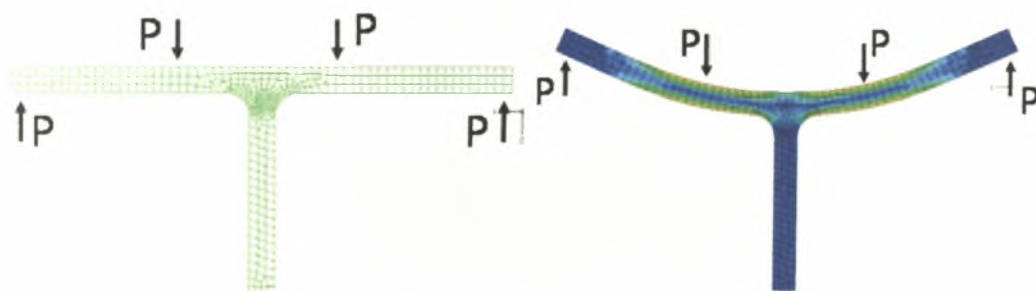
Με βάση την καμπύλη που προέκυψε μπορεί να γίνει ο σχεδιασμός εξαρτημάτων με παρόμοιο τύπο συγκόλλησης έναντι κόπωσης. Με δεδομένη την ονομαστική τάση με την οποία καταπονείται το εξάρτημα μπορεί να προσδιοριστεί ο συνολικός αριθμός των κύκλων ζωής του.

Κεφάλαιο 4

4.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της έρευνας της συμπεριφοράς των συγκολλημένων μεταλλικών πλακών από χάλυβα υψηλής αντοχής, σε κόπωση έγινε η μελέτη, με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων, του φαινομένου της συγκέντρωσης τάσεων κοντά στη συγκόλληση (θεωρία *Hot Spot Stress*). Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης, με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, της κάμψης τεσσάρων (4) σημείων (βλ. σχήμα 4.1.1), που είχε πραγματοποιηθεί εργαστηριακά, με διαφορετικές γεωμετρίες για την περιοχή της συγκόλλησης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι δύο (2) διαστάσεων (2D) με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης και με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για την επίλυση κελυφών (*shell elements*, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία, Lotsberg 2005, Sigurdsson 2005, Kim et al 2004, Fricke 2004 κ.α.).

Η μελέτη επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό της τιμής της τάσης στο κρίσιμο σημείο και τον υπολογισμό των συντελεστών συγκέντρωσης των τάσεων (*Stress Concentration Factors*) που μεταβάλλονται με την αλλαγή της γεωμετρίας της συγκόλλησης. Το κρίσιμο σημείο για τις συγκολλημένες μεταλλικές πλάκες, που ελέγχθηκαν εργαστηριακά σε κόπωση, ευρίσκεται στην ρίζα της συγκόλλησης από όπου έχουμε και την έναρξη της ρωγμής κατά την αστοχία. Για τη συναρμογή της συγκόλλησης δοκιμάστηκαν προσομοιώματα με καμπύλη συναρμογής αλλά και χωρίς. Σε όλα τα μοντέλα έγινε η παραδοχή της μη συμμετοχής του φαινομένου των τοπικών ατελειών της συγκόλλησης στη συγκέντρωση των τάσεων (*notch effect*).



Σχήμα 4.1.1. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της κάμψης τεσσάρων(4) σημείων.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

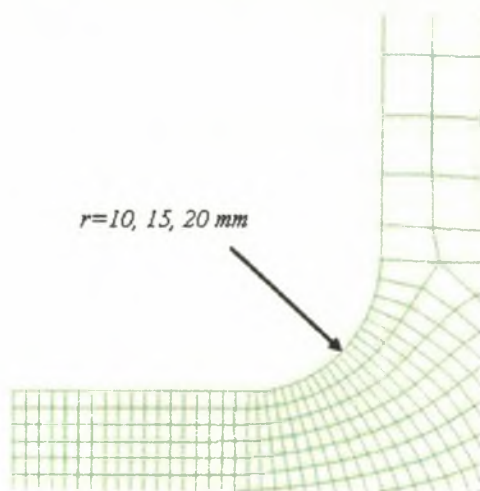
4.2 Προσομοίωση κάμψης τεσσάρων (4) σημείων με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης

Για τα μοντέλα της προσομοίωσης της κάμψης τεσσάρων (4) σημείων χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης, οκτώ (8) κόμβων, μειωμένης και ακριβούς ολοκλήρωσης (CPE8 και CPE8R της βιβλιοθήκης του ABAQUS). Το πρόβλημα λύθηκε σε δύο (2) διαστάσεις θεωρώντας μία κάθετη τομή των συγκολλημένων πλακών μοναδιαίου πάχους.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν είναι ίδιες με αυτές των εργαστηριακών ελέγχων και η επιβεβλημένη ένταση ίση με 400 MPa (ονομαστική τάση). Οι επιλύσεις έγιναν θεωρώντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά του υλικού, με μέτρο ελαστικότητας E=210 GPa και λόγο Poisson $\nu=0.3$. Η ανηγμένη παραμόρφωση ε που αντιστοιχεί σε τάση $\sigma=400$ MPa υπολογίζεται,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} (1 - \nu^2) = \frac{400}{210,000} (1 - 0.3^2) = 1.73 \cdot 10^{-3}$$

Αρχικά δοκιμάστηκαν προσομοιώματα στα οποία η γεωμετρία της συγκόλλησης δίνεται με μία καμπύλη συναρμογής (βλ. σχήμα 4.2.1), για την οποία δοκιμάστηκαν ακτίνες καμπύλων συναρμογής των 10, 15 και 20 mm.

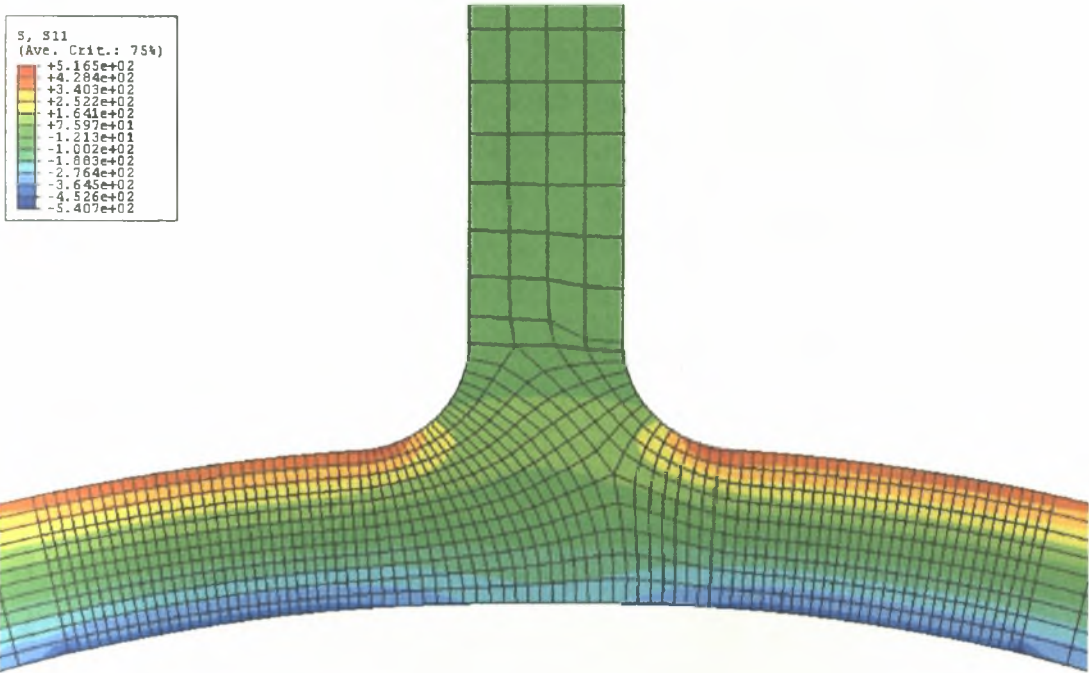


Σχήμα 4.2.1. Προσομοίωμα με ακτίνες καμπυλότητας για την περιοχή της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

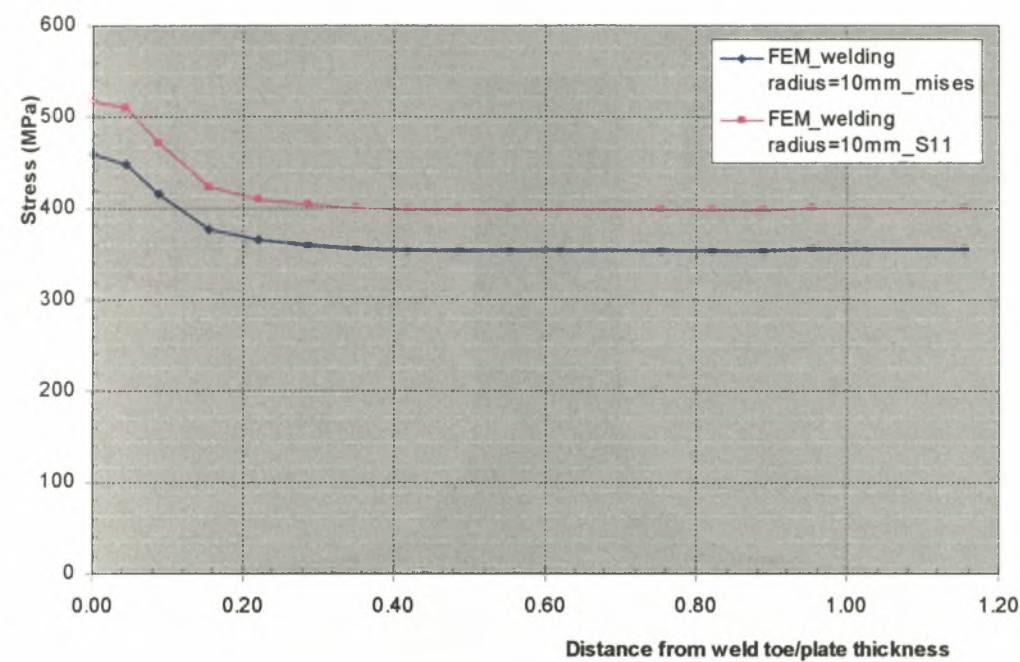
Από τις επιλύσεις, όπως φαίνονται και στα γραφήματα που ακολουθούν, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η καμπυλότητα της γεωμετρίας της συγκόλλησης τόσο μειώνεται η συγκέντρωση των τάσεων στην κρίσιμη περιοχή. Η τάση στην κρίσιμη περιοχή εμφανίζεται αυξημένη σε σχέση με τη ονομαστική, όπως αναμενόταν, σε ποσοστό 29%, 20% και 14% αντίστοιχα.

Επίλυση 1^η (r=10 mm)

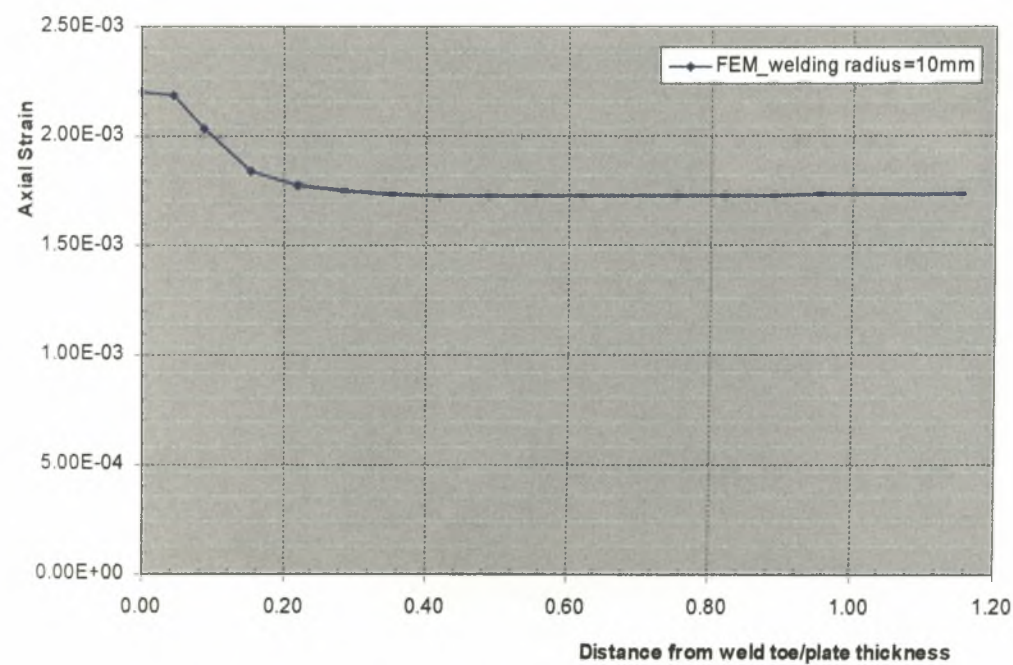


Σχήμα 4.2.2. Συγκόλληση με ακτίνα καμπυλότητα $r=10\text{ mm}$.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία



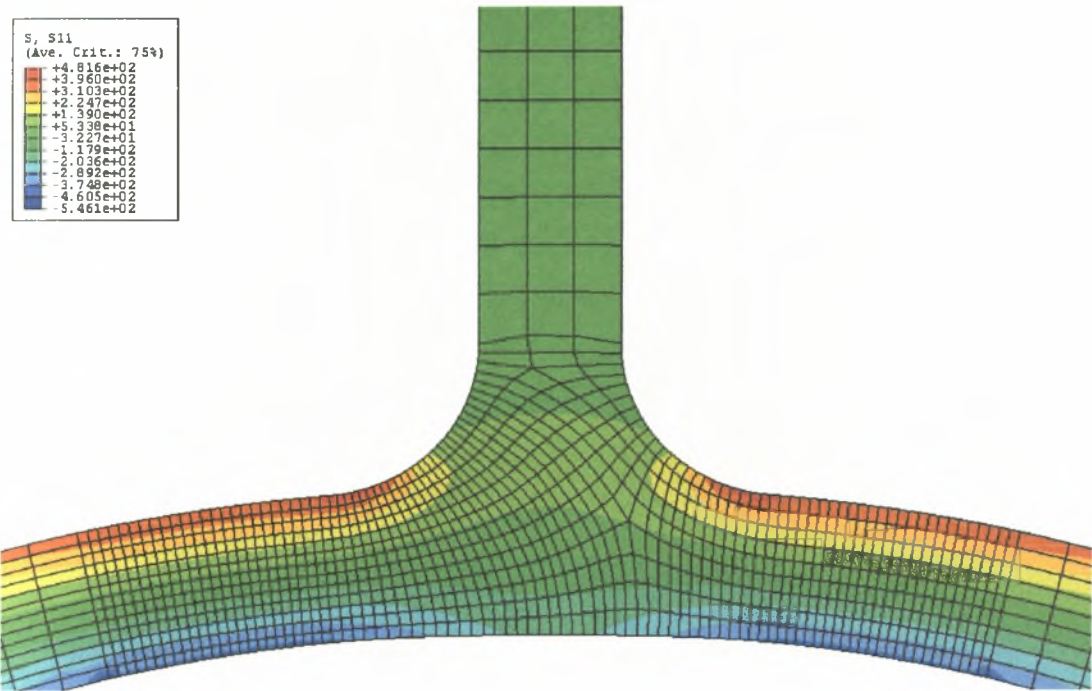
Γράφημα 4.2.1. Διάγραμμα τάσης κατά τον κύριο άξονα – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.



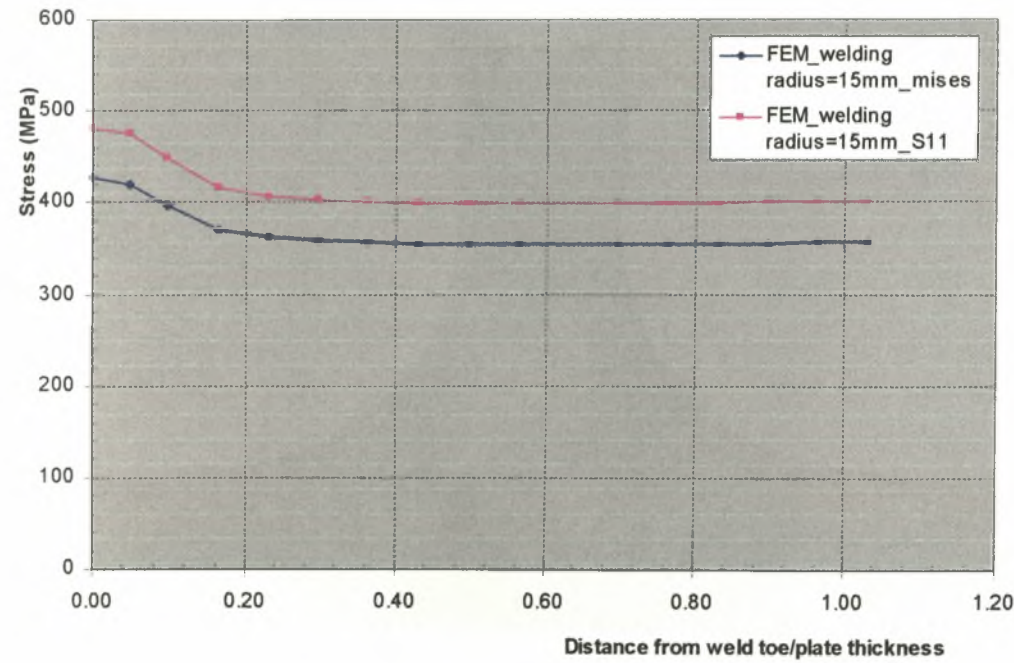
Γράφημα 4.2.2. Διάγραμμα ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

Επίλυση 2^η (r=15 mm)

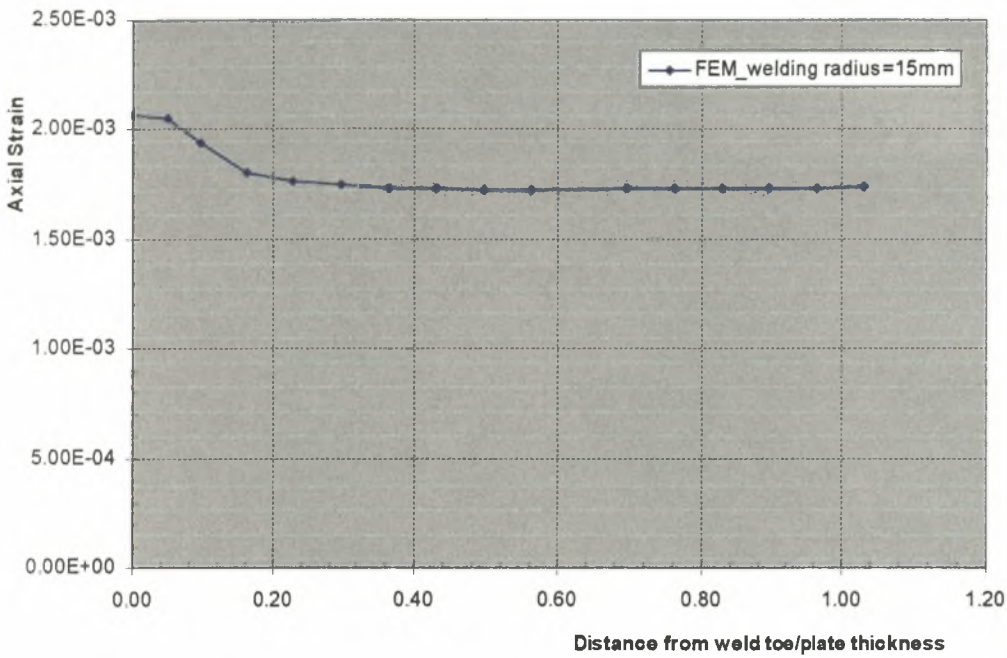


Σχήμα 4.2.3. Συγκόλληση με ακτίνα καμπυλότητας $r=15\text{ mm}$.



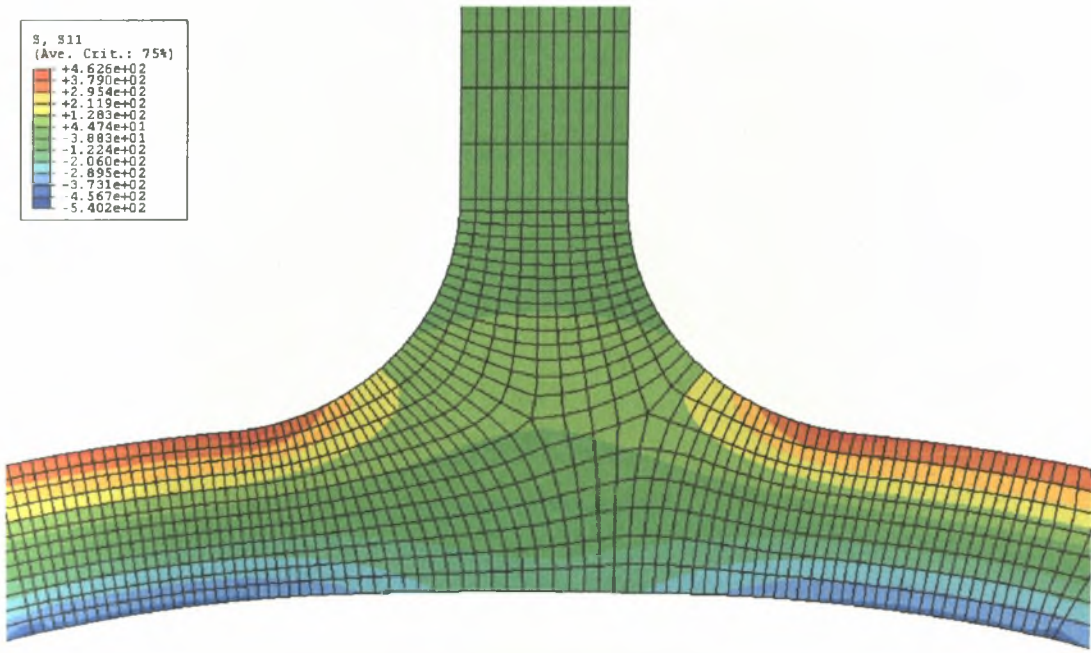
Γράφημα 4.2.3. Διάγραμμα τάσης κατά τον κύριο άξονα – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία



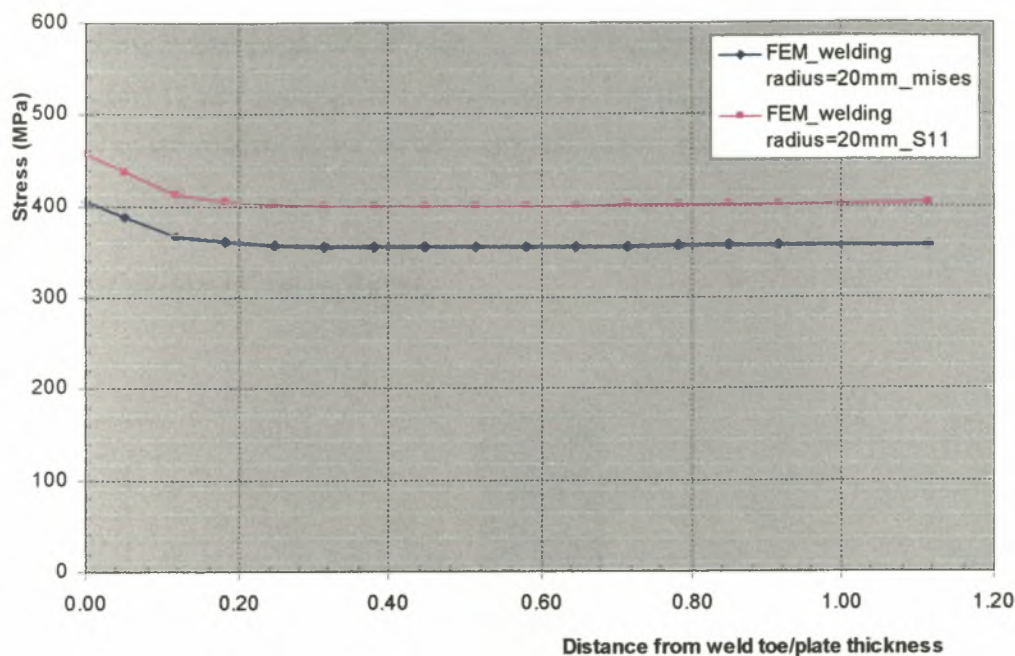
Γράφημα 4.2.4. Διάγραμμα ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Επίλυση 3^η (r=20 mm)

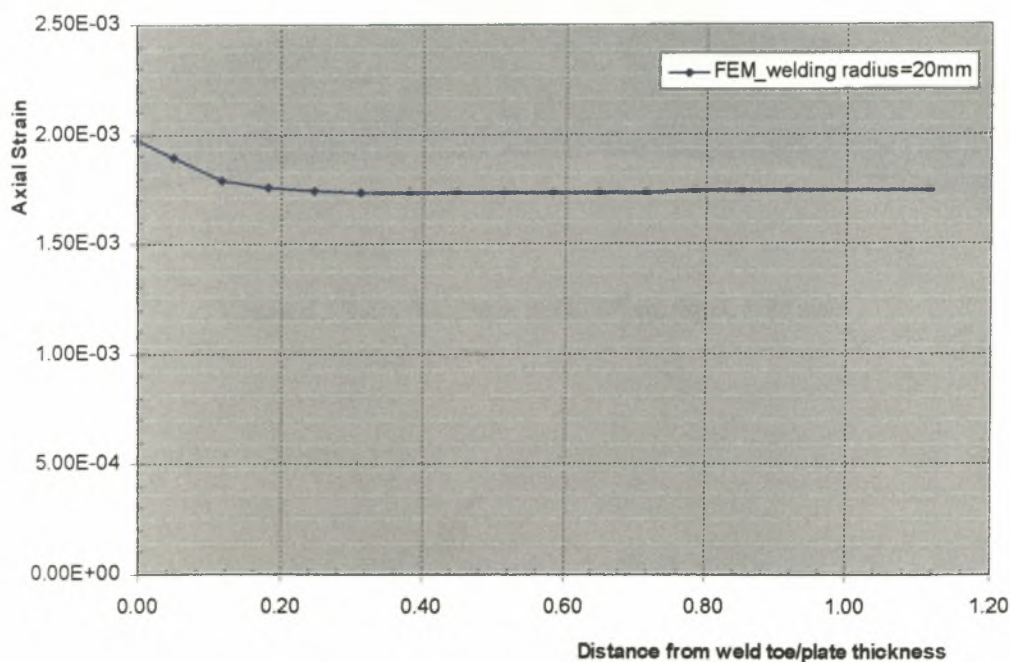


Σχήμα 4.2.4. Συγκόλληση με ακτίνα καμπυλότητας r=20 mm.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με
Πεπερασμένα Στοιχεία



Γράφημα 4.2.5. Διάγραμμα τάσης κατά τον κύριο άξονα – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

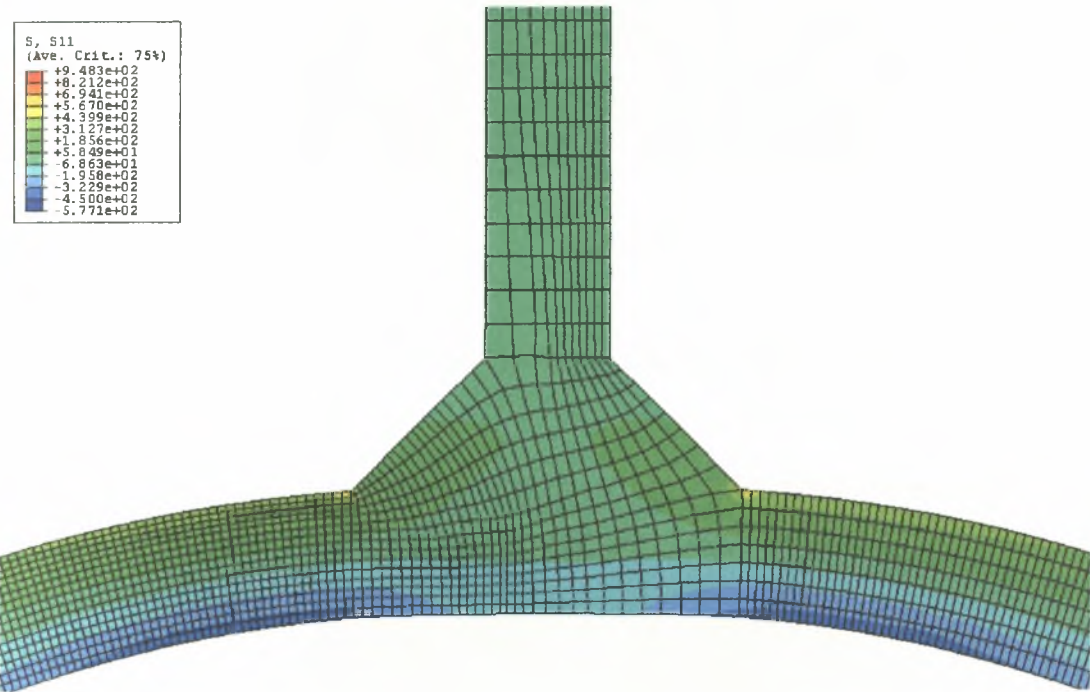


Γράφημα 4.2.6. Διάγραμμα ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

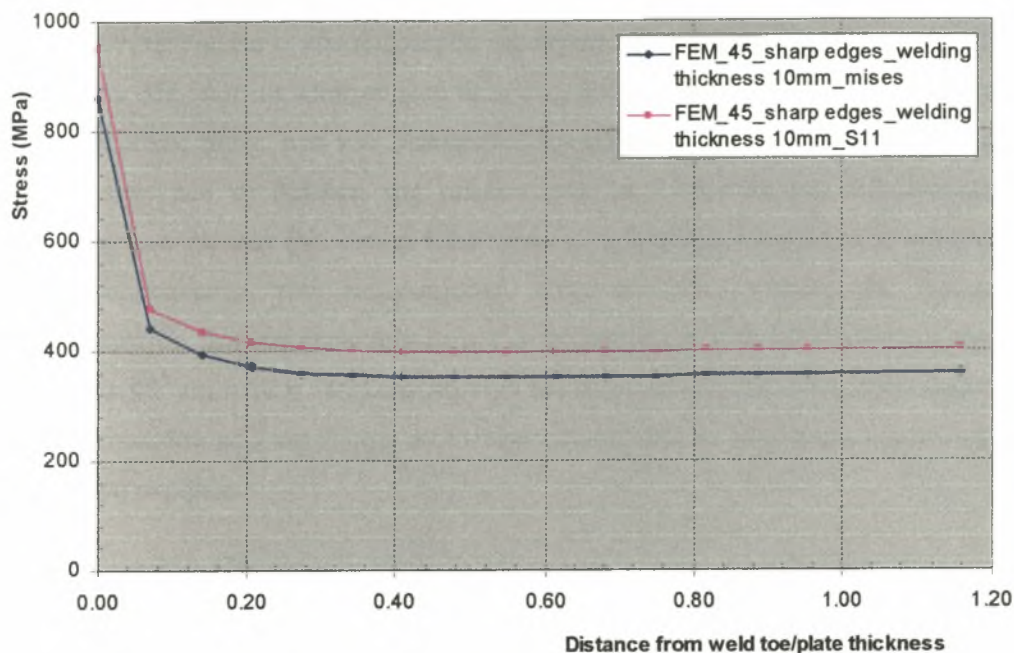
Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση του προσομοιώματος όπου η γεωμετρία της συγκόλλησης δίνεται με κλίσεις 45° εκατέρωθεν του σημείου της συγκόλλησης και με πάχος συγκόλλησης 10 mm χωρίς όμως να προστεθεί καμπυλότητα στο σημείο της σύνδεσης. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρήθηκε ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο.

Επίλυση 4^η (κλίση 45° και $t=10\text{ mm}$)

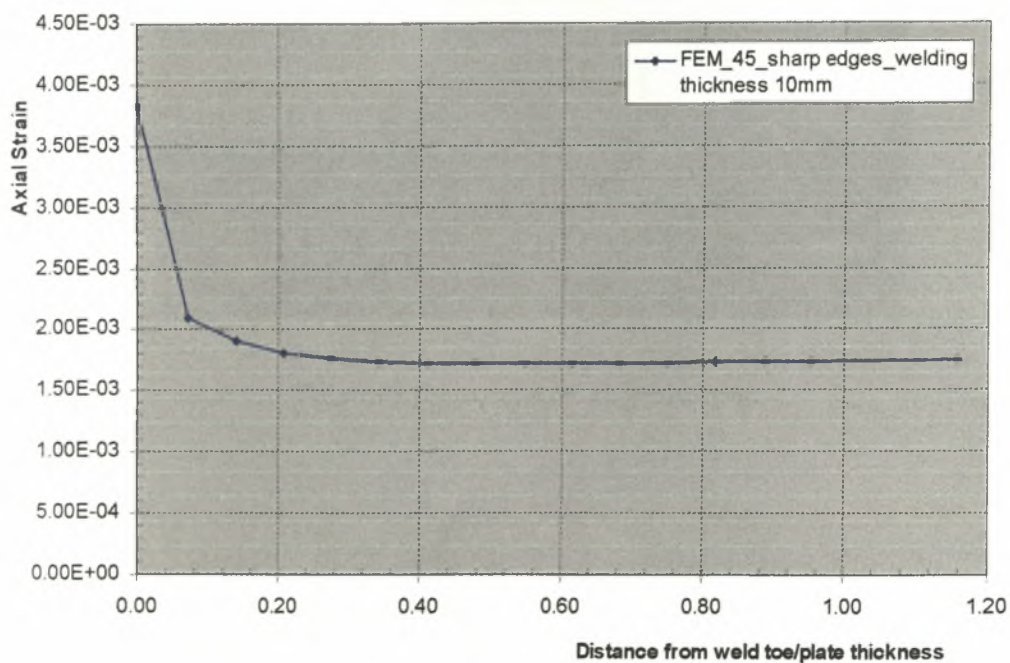


Σχήμα 4.2.5. Συγκόλληση με γωνία 45° και πάχος $t=10\text{ mm}$.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με
Πεπερασμένα Στοιχεία



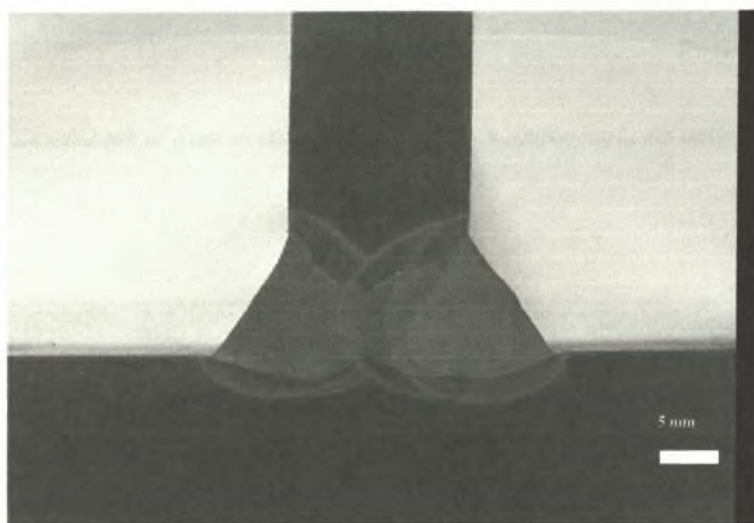
Γράφημα 4.2.7. Διάγραμμα τάσης κατά τον κύριο άξονα – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.



Γράφημα 4.2.8. Διάγραμμα ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

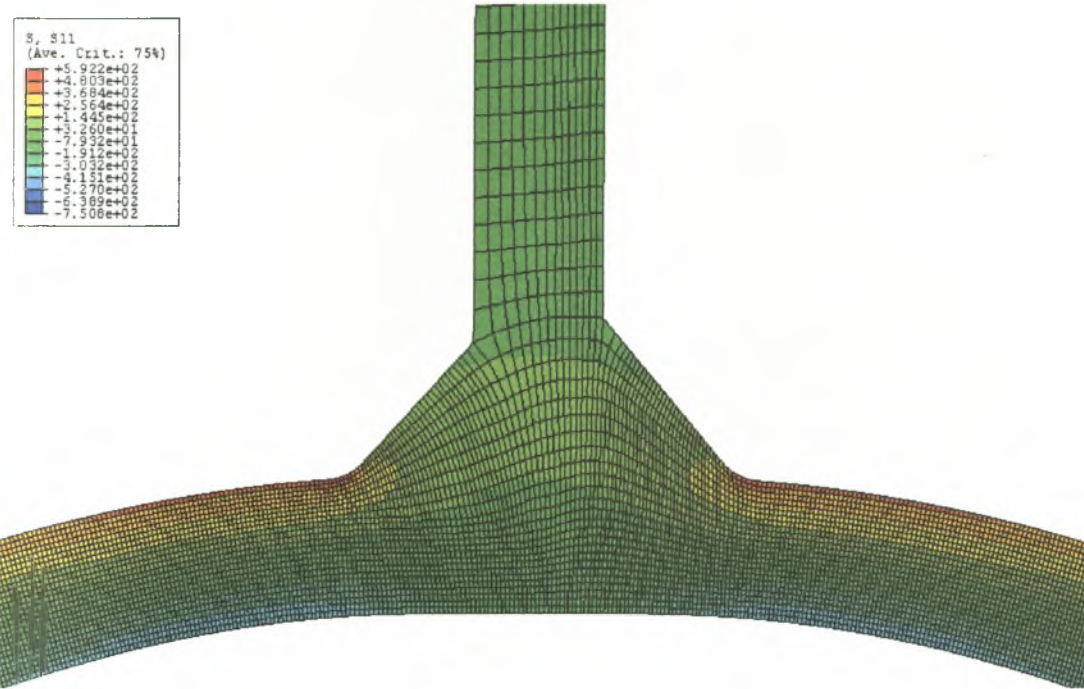
Όπως παρατηρήθηκε, η συγκέντρωση των τάσεων στην περίπτωση αυτή είναι πολύ μεγάλη. Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της τάσης γίνεται δύσκολος διότι η τοπική τάση απειρίζεται. Με βάση τα προηγούμενα θεωρείται σκόπιμο για την άρση της αοριστίας στην τιμή της τοπικής τάσης, στις νέες γεωμετρίες που δοκιμάζονται να προστεθεί και μία μικρή καμπυλότητα. Με τη βοήθεια της μικρογραφίας της συγκόλλησης των δοκιμιών των συγκολλημένων πλακών (βλ. σχήμα 4.2.6) έγινε η προσπάθεια να περιγραφεί η συγκόλληση στα προσομοιώματα των πεπερασμένων στοιχείων όσο γίνεται πιο κοντά στην πραγματικότητα. Στη νέα γεωμετρία οι γωνίες εκατέρωθεν της συγκόλλησης δεν είναι ίδιες. Η μία είναι 48° και η άλλη 54° . Στην περιοχή του κρίσιμου σημείου δίνεται μία μικρή ακτίνα καμπυλότητας ίση με 5 και 10 mm αντίστοιχα και αυξήθηκε η πυκνότητα των στοιχείων για μεγαλύτερη ακρίβεια.



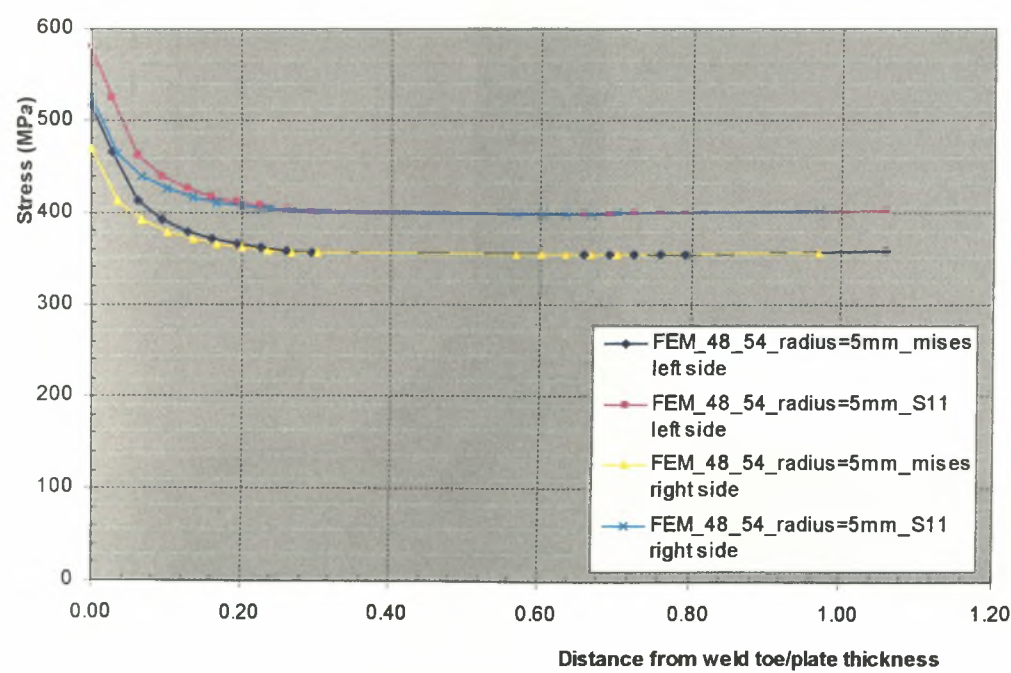
Σχήμα 4.2.6. Μικρογραφία της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

Επίλυση 5^η (διαφορετικές κλίσεις και ακτίνα καμπυλότητας $r=5mm$)

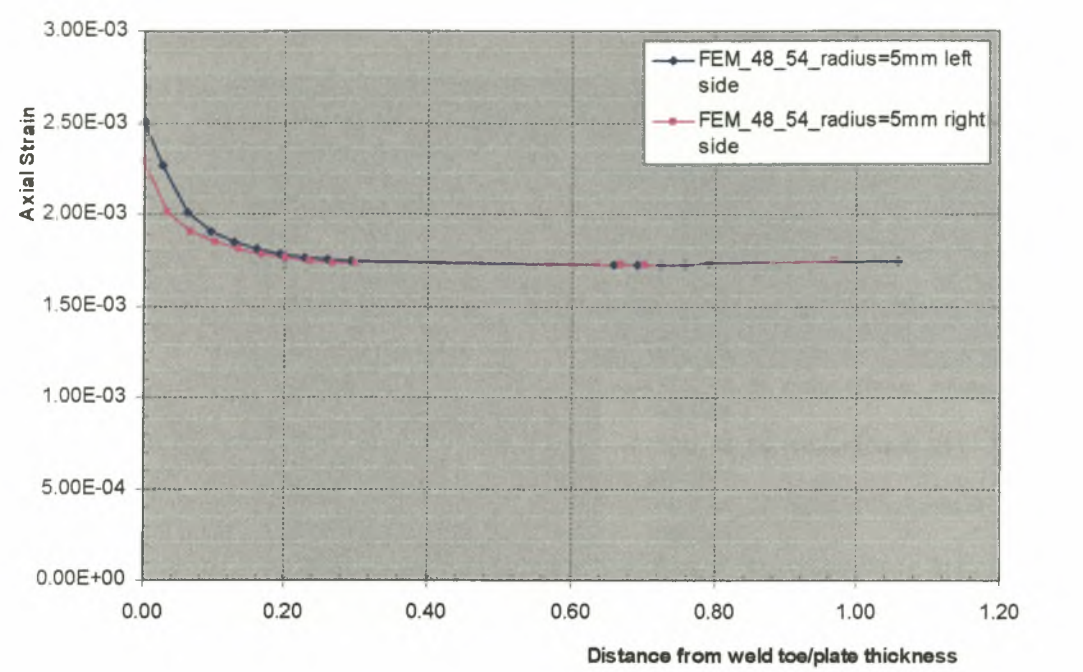


Σχήμα 4.2.7. Συγκόλληση με διαφορετικές γωνίες με βάση τη μικρογραφία και ακτίνα καμπυλότητας $r=5mm$.



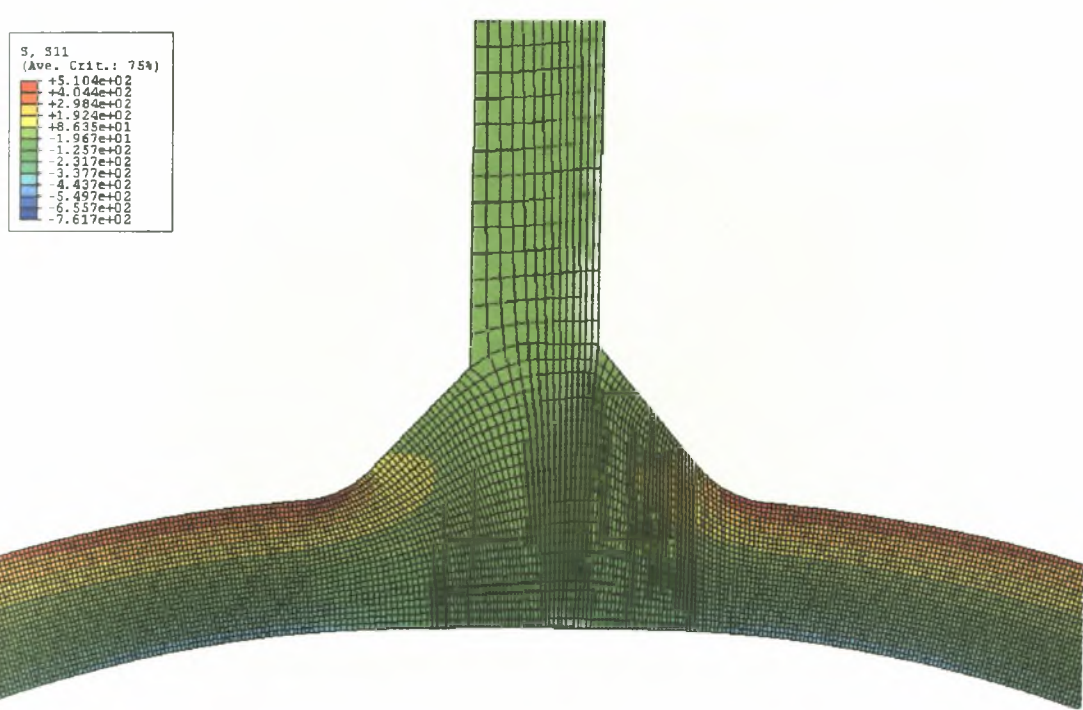
Γράφημα 4.2.9. Διάγραμμα τάσης κατά τον κύριο άξονα– απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία



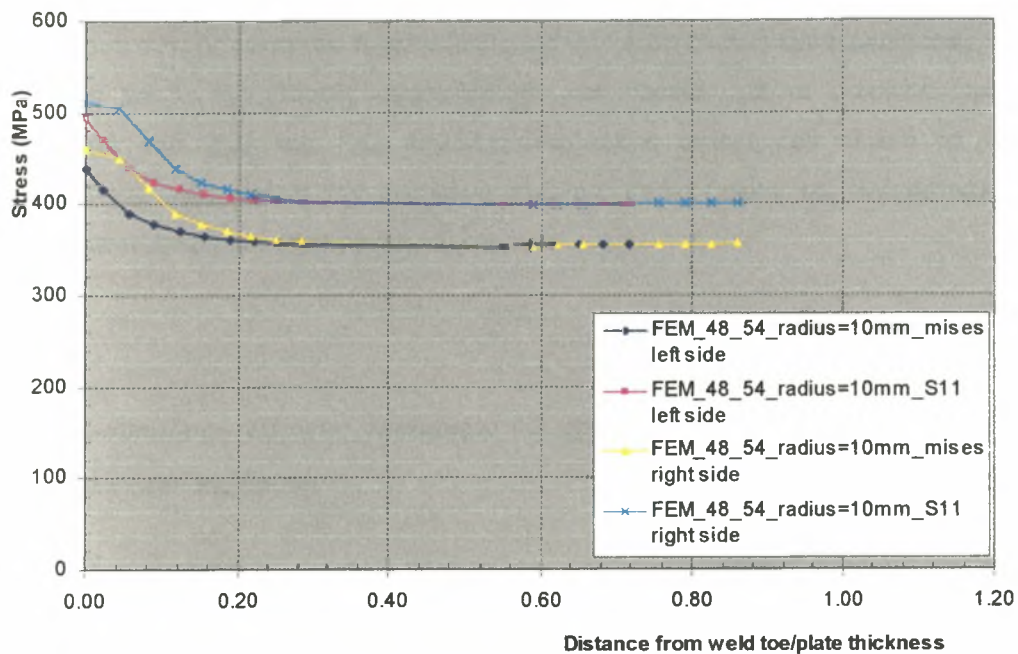
Γράφημα 4.2.10. Διάγραμμα ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Επίλυση 7^η (διαφορετικές κλίσεις και ακτίνα καμπυλότητας r=10mm)

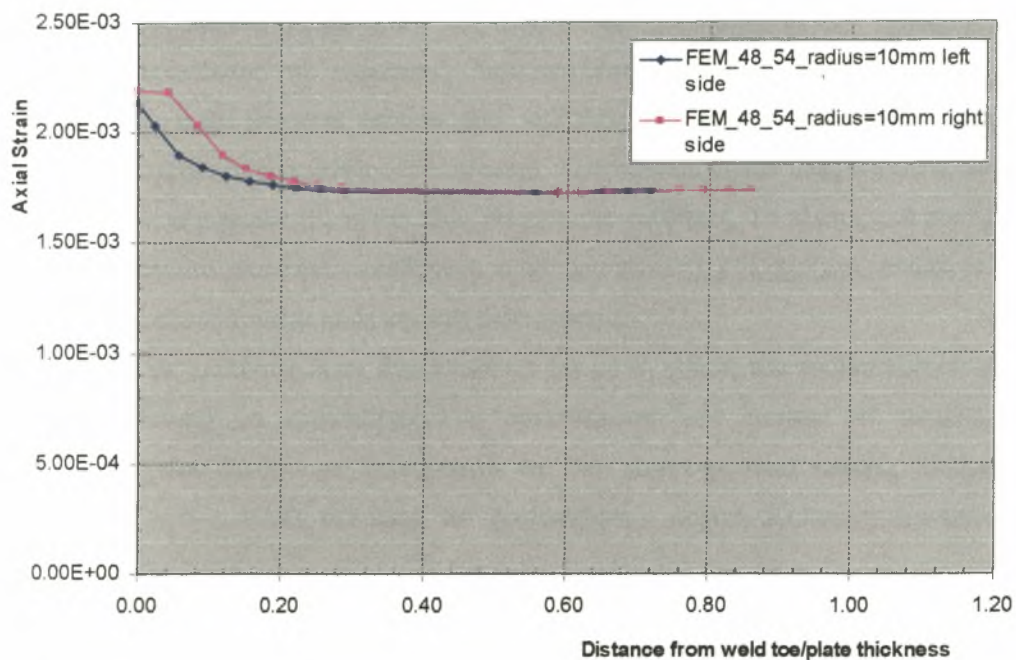


Σχήμα 4.2.8. Συγκόλληση με διαφορετικές γωνίες με βάση τη μικρογραφία και ακτίνα καμπυλότητας r=10mm.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με
Πεπερασμένα Στοιχεία



Γράφημα 4.2.11. Διάγραμμα τάσης κατά τον κύριο άξονα- απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.



Γράφημα 4.2.12. Διάγραμμα ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης – απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ακτίνα καμπυλότητας τόσο μειώνεται η συγκέντρωση των τάσεων (όπως και στα προηγούμενα προσομοιώματα). Τελικά, βλέπουμε ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων για το δεδομένο πρόβλημα κυμαίνεται από 1.23 έως 1.45, δηλαδή συνολικά η αντοχή του υλικού σε κόπωση λαμβάνοντας τώρα υπόψη την αυξημένη τιμή της τάσης (πέραν της ονομαστικής) είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αρχικά εκτιμώμενη.

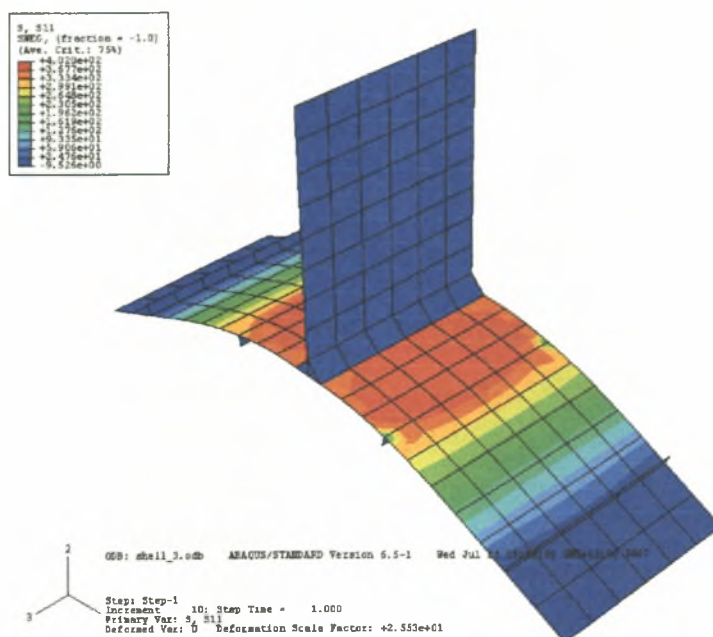
4.3 Προσομοίωση κάμψης τεσσάρων (4) σημείων με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία τύπου κελύφους.

Για την απλούστευση του προβλήματος του προσδιορισμού της τάσης στο κρίσιμο σημείο, δεδομένου ότι μία κατασκευή συνήθως αποτελείται από πολλά συγκολλημένα στοιχεία διαφορετικών γεωμετριών και δεν είναι πάντα δυνατή η αναλυτική περιγραφή της κρίσιμης περιοχής, προτείνεται (Lotsberg et al 2005, Fricke et al 2005) η χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell elements) με μέγεθος στοιχείων συναρτήσει του πάχους του στοιχείου της κατασκευής.

Ακολουθώντας τα παραπάνω δημιουργήθηκαν δύο (2) μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με shell elements (τύπου S8R της βιβλιοθήκης του ABAQUS, επιφανειακά στοιχεία 8 κόμβων με μειωμένη ολοκλήρωση). Χρησιμοποιήθηκαν ίδιες ιδιότητες υλικού με τα προηγούμενα μοντέλα (E , ν) και ίδιες συνοριακές συνθήκες. Το πλάτος του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων για το δεδομένο πρόβλημα είναι $t \times t$ (15x15 mm) σύμφωνα με όσα προτείνονται στους κανονισμούς και στη βιβλιογραφία.

Από τις επιλύσεις όμως διαπιστώθηκε ότι με τη χρήση του προτεινόμενου κανάβου δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των τάσεων. Η γεωμετρία της συγκόλλησης δεν δίνεται με λεπτομέρεια και δεν παρατηρούνται τοπικές αυξήσεις των τάσεων (βλ. σχήμα 4.3.1). Για αυτό και προτιμήθηκε η αρχική αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος.

Διερεύνηση της Συμπεριφοράς των Συγκολλημένων Μεταλλικών Πλακών σε Κόπωση με Πεπερασμένα Στοιχεία



Σχήμα 4.3.1. Αριθμητικό προσομοίωμα με *shell elements*.

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα

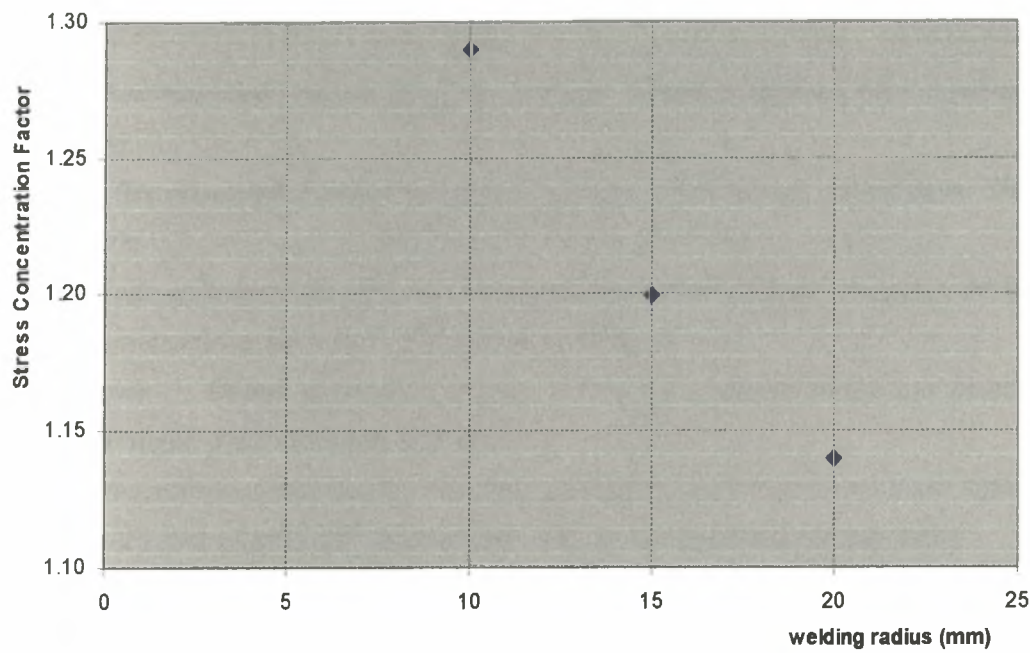
Όπως παρατηρήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία κατά την οποία προσδιορίστηκε η καμπύλη σχεδιασμού ονομαστικής τάσης και συνολικών κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία ο συγκεκριμένος χάλυβας δίνει συνολικά μεγαλύτερες αντοχές από αυτές που προβλέπονται στους υπάρχοντες κανονισμούς με βάση τη μέθοδο του *Classification*. Το άνοιγμα της ρωγμής η οποία αυξάνεται σε μήκος και οδηγεί στην τελική αστοχία του δοκιμίου γίνεται στην περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσεων (στη ρίζα της συγκόλλησης) όπως έδειξε και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κάμψης τεσσάρων (4) σημείων στην οποία υπεβλήθησαν τα δοκίμια των συγκολλημένων επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων.

Από τη σύγκριση των υπάρχοντων κανονισμών ή οδηγιών για τον σχεδιασμό έναντι κόπωσης φαίνεται ότι δεν υπάρχει σαφές πλαίσιο που να περιλαμβάνει χάλυβες υψηλών αντοχών και οι υπάρχουσες καμπύλες σχεδιασμού υποεκτιμούν τη συνολική αντοχή των συγκεκριμένων επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων.

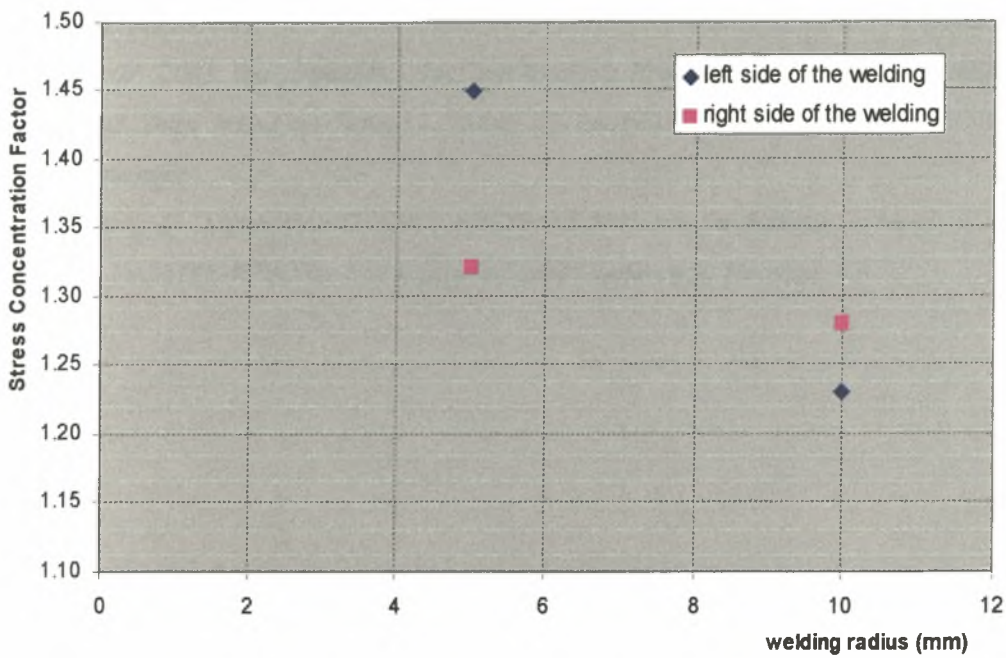
Από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται ότι η συγκέντρωση των τάσεων στα κρίσιμα σημεία κυμαίνεται από 20 έως 40% πλέον της υπολογισμένης ονομαστικής τάσης, στοιχείο που αποδεικνύει ότι η τελική αντοχή των συγκεκριμένων χαλύβων έναντι κόπωσης είναι ακόμα υψηλότερη. Η καλύτερη προσομοίωση της γεωμετρίας των δοκιμίων επιτυγχάνεται με την προσθήκη μικρού τόξου καμπυλότητας στα σημεία προσαρμογής των πλακών καθώς με αυτό τον τρόπο έχουμε την άρση της αοριστίας του προσδιορισμού των τάσεων στο κρίσιμο σημείο. Η αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης των τάσεων στην περιοχή του κρίσιμου σημείου και σε πιο ομαλή μετάβαση από την αυξημένη τοπικά τάση στην ονομαστική (βλ. σχήματα 5.1.1 και 5.1.2).

Η παρούσα εργασία δύναται να συμπληρωθεί με πειραματικές δοκιμές που θα δείξουν το βαθμό δυσκολίας ανοίγματος ρωγμών στο συγκριμένο είδος χάλυβα καθώς και με ανάπτυξη μιας αξιόπιστης μεθόδου γραμμικής παρεμβολής με την οποία θα προσδιορίζεται τελικά η τάση στο κρίσιμο σημείο λαμβάνοντας υπόψη τις τάσεις σε γειτονικά σημεία.

Συμπεράσματα



Σχήμα 5.1.1. Σχηματικό διάγραμμα όπου φαίνεται η επιρροή της καμπυλότητας στη γεωμετρία της συγκόλλησης των επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων.



Σχήμα 5.1.2. Σχηματικό διάγραμμα όπου φαίνεται η επιρροή της καμπυλότητας στην τελική γεωμετρία της συγκόλλησης των επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων που επιλέχθηκε.

Βιβλιογραφία

- [1]. DnV Recommended Practice RP-C203 “Fatigue Design of Offshore Steel Structures” August 2005.
- [2]. DnV Recommended Practice RP-C206 “Fatigue Methodology of Offshore Ships” October 2006
- [3]. BSI. Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures. BS7608: 1993 (with amendments AMD 8337, 15th February 1995).
- [4]. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1.9: General Rules and Rules for Buildings. Fatigue. prEN 1993-1-9, May 2003.
- [5]. API. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API RP2A LRFD (20th Edition, July 1993) & LRFD (1st Edition July 1993).
- [6]. International Institute of Welding. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW document XIII 1965r14-03/XV-1127r14-03, July 2006.
- [7]. “Comparison of Fatigue Provisions in Codes and Standards” Bomel Limited, Offshore Technology Report 2001/083
- [8]. Lotsberg I. 2006. Fatigue Design of Plated Structures Using Finite Element Analysis. In SAOS 2006, Vol. 1 No.1.
- [9]. Fricke W. 2001. Recommended Hot Spot Analysis Procedure for Structural Analysis of FPSO's and Ships based on Round – Robin FE analyses. In the proceedings of the 11th ISOPE, Stavenger.
- [10]. Lotsberg I. , Sigurdsson G. 2004. Hot Spot S-N Curve for Fatigue Analysis of Plated Structures. In OMAE-FPSO'04-0014, International Conference, Houston, TX.

Παράρτημα

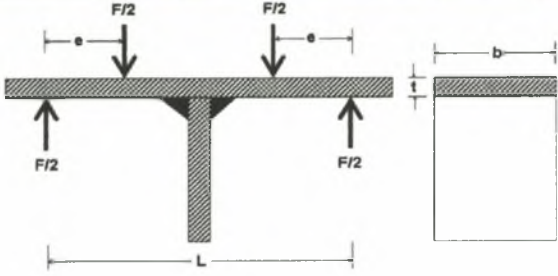


ΔΟΚΙΜΗ: Κάμψη τεσσάρων (4) σημείων συγκολλημένων μεταλλικών πλακών (6WA47)

γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίου		
κωδικός δοκιμίου	PL-260(2)	
άνοιγμα δοκιμίου, L (mm)	235	
πάχος δοκιμίου, t (mm)	15	
πλάτος δοκιμίου, b (mm)	95	
μοχλοβραχίονας, e (mm)	70	
δεδομένα δοκιμής		
Δσ (MPa)	260	
R (σ _{min} /σ _{max})	0.5	
Συχνότητα, f (Hz)	5	
σ _{max} (MPa)	520	
σ _{min} (MPa)	260	
F _{max} (kN)	52.9	
F _{mean} (kN)	39.7	
F _{min} (kN)	26.5	
ΔF/2 - Span (kN)	13.2	
Αρχικό φορτίο δοκιμής (kN)	1.50	
Εναρξη Δοκιμής	5/4/2007	
Λήξη Δοκιμής	6/4/2007	
ημερομηνία	αριθμός κύκλων, N	παρατηρήσεις
5/4/2007	2	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST1_260(2))
5/4/2007	120,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST2_260(2))
6/4/2007	85,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST3_260(2))
6/4/2007	24,856	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST4_260(2))
		τελική θραυση δοκιμίου
	Σύνολο κύκλων φόρπισης, N _f	229,858



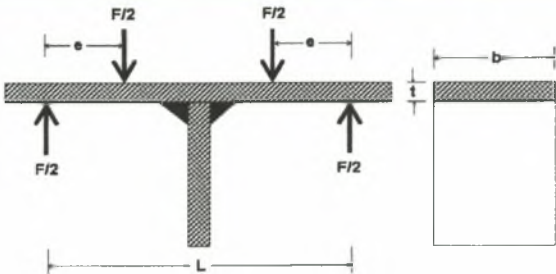
ΔΟΚΙΜΗ: | Κάμψη τεσσάρων (4) σημείων συγκολλημένων μεταλλικών πλακών (6WA47)

γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίου		
κωδικός δοκιμίου	PL-220(1)	
άνοιγμα δοκιμίου, L (mm)	235	
πάχος δοκιμίου, t (mm)	15	
πλάτος δοκιμίου, b (mm)	95	
μοχλοβραχίονας, e (mm)	70	
δεδομένα δοκιμής		παρατηρήσεις
Δσ (MPa)	220	
R (σ _{min} /σ _{max})	0.5	
Συχνότητα, f (Hz)	5	
σ _{max} (MPa)	440	
σ _{min} (MPa)	220	
F _{max} (kN)	44.8	
F _{mean} (kN)	33.6	
F _{min} (kN)	22.4	
ΔF/2 - Span (kN)	11.2	
Αρχικό φορτίο δοκιμής (kN)	1.75	
Έναρξη Δοκιμής	15/1/2007	
Λήξη Δοκιμής	17/1/2007	
ημερομηνία	αριθμός κύκλων, N	
15/1/2007	0	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST1_220)
15/1/2007	50,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST2_220)
15/1/2007	50,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST3_220)
15/1/2007	50,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST4_220)
16/1/2007	100,000	
17/1/2007	119,960	ρωγμή (μήκους 6 mm) στην αριστερή παρειά της συγκόλλησης
17/1/2007	4	τελική θραυση δοκιμίου (αρχείο:pl_ST5_220)
	Σύνολο κύκλων φόρτισης, N _f	369,964

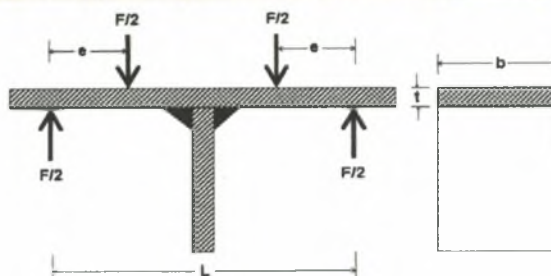


ΔΟΚΙΜΗ: Κάμψη τεσσάρων (4) σημείων συγκολλημένων μεταλλικών πλακών (6WA47)

γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίου	
κωδικός δοκιμίου	PL-200(1)
άνοιγμα δοκιμίου, L (mm)	235
πάχος δοκιμίου, t (mm)	15
πλάτος δοκιμίου, b (mm)	95
μοχλοβραχίονας, e (mm)	70
δεδομένα δοκιμής	
Δσ (MPa)	200
R (σ _{min} /σ _{max})	0.5
Συχνότητα, f (Hz)	5
σ _{max} (MPa)	400
σ _{min} (MPa)	200
F _{max} (kN)	40.7
F _{mean} (kN)	30.5
F _{min} (kN)	20.4
ΔF/2 - Span (kN)	10.2
Αρχικό φορτίο δοκιμής (kN)	1.50
Εναρξη Δοκιμής	17/1/2007
Λήξη Δοκιμής	19/1/2007



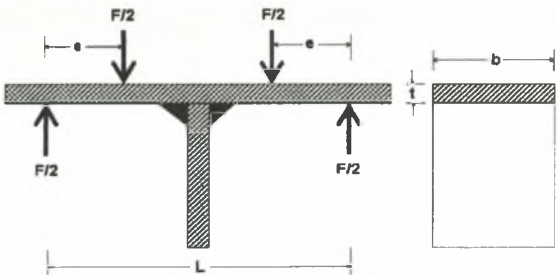
ημερομηνία	αριθμός κύκλων, N	παρατηρήσεις
17/1/2007	0	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST1_200)
17/1/2007	100,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST2_200)
18/1/2007	250,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST3_200)
18/1/2007	150,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST4_200)
19/1/2007	200,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST5_200)
19/1/2007	15,000	έναρξη ρηγμάτωσης αριστερά (στο πίσω μέρος του δοκιμίου)
19/1/2007	10,000	
19/1/2007	6,500	τελική θραυση δοκιμίου (αρχείο:pl_ST6_200)
	Σύνολο κύκλων φόρτισης, N _f	731,500





ΔΟΚΙΜΗ: Κάμψη τεσσάρων (4) σημείων συγκολλημένων μεταλλικών πλακών (6WA47)

γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίου	
κωδικός δοκιμίου	PL-180(1)
άνοιγμα δοκιμίου, L (mm)	235
πάχος δοκιμίου, t (mm)	15
πλάτος δοκιμίου, b (mm)	95
μοχλοβραχίονας, e (mm)	70
δεδομένα δοκιμής	
Δσ (MPa)	180
R (σ _{min} /σ _{max})	0.5
Συχνότητα, f (Hz)	5
σ _{max} (MPa)	360
σ _{min} (MPa)	180
F _{max} (kN)	36.6
F _{mean} (kN)	27.5
F _{min} (kN)	18.3
ΔF/2 - Span (kN)	9.2
Αρχικό φορτίο δοκιμής (kN)	1.40
Εναρξη Δοκιμής	22/1/2007
Λήξη Δοκιμής	25/1/2007

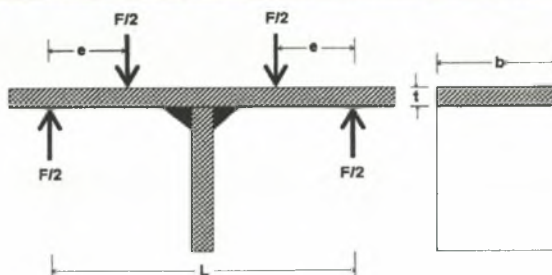


ημερομηνία	αριθμός κύκλων, N	παρατηρήσεις
22/1/2007	0	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST1_180)
23/1/2007	350,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST2_180)
24/1/2007	400,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST3_180)
24/1/2007	50,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST4_180)
24/1/2007	50,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST5_180)
25/1/2007	67,656	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST6_180)
25/1/2007	626	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST7_180)
		στους τελευταίους δύο (2) κύκλους προώθηση ρωγμής πάνω από 5 mm (σε δύο μέτωπα)
	Σύνολο κύκλων φόρτισης, N,	918,282



ΔΟΚΙΜΗ: Κάμψη τεσσάρων (4) σημείων συγκολλημένων μεταλλικών πλακών (6WA47)

γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίου	
κωδικός δοκιμίου	PL-160(1)
άνοιγμα δοκιμίου, L (mm)	235
πάχος δοκιμίου, t (mm)	15
πλάτος δοκιμίου, b (mm)	95
μοχλοβραχίονας, e (mm)	70
δεδομένα δοκιμής	
$\Delta\sigma$ (MPa)	160
R ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)	0.5
Συχνότητα, f (Hz)	5
σ_{\max} (MPa)	320
σ_{\min} (MPa)	160
F_{\max} (kN)	32.6
F_{mean} (kN)	24.4
F_{\min} (kN)	16.3
$\Delta F/2$ - Span (kN)	8.1
Αρχικό φορτίο δοκιμής (kN)	1.40
Έναρξη Δοκιμής	19/1/2007
Λήξη Δοκιμής	21/1/2007



ημερομηνία	αριθμός κύκλων, N	παρατηρήσεις
19/1/2007	0	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST1_160)
20/1/2007	450,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST2_160)
21/1/2007	507,266	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST3_160)
21/1/2007	600	τελική θραυση δοκιμίου (αρχείο:pl_ST4_160)
	Σύνολο κύκλων φόρτισης, N_f	957,866



ΔΟΚΙΜΗ: Κάμψη τεσσάρων (4) σημείων συγκολλημένων μεταλλικών πλακών (6WA47)

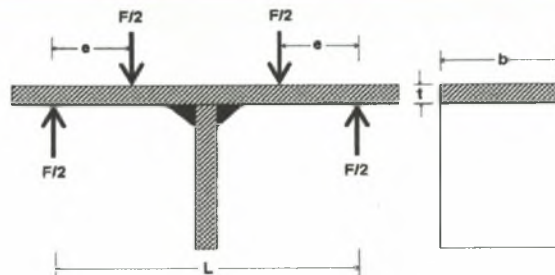
γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίου

κωδικός δοκιμίου	PL-160(2)
άνοιγμα δοκιμίου, L (mm)	235
πάχος δοκιμίου, t (mm)	15
πλάτος δοκιμίου, b (mm)	95
μοχλοβραχίονας, e (mm)	70

δεδομένα δοκιμής

Δσ (MPa)	160
R ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)	0.5
Συχνότητα, f (Hz)	5
σ_{max} (MPa)	320
σ_{min} (MPa)	160
F_{max} (kN)	32.6
F_{mean} (kN)	24.4
F_{min} (kN)	16.3
$\Delta F/2$ - Span (kN)	8.1

Αρχικό φορτίο δοκιμής (kN)	1.50
Έναρξη Δοκιμής	2/4/2007
Λήξη Δοκιμής	4/4/2007

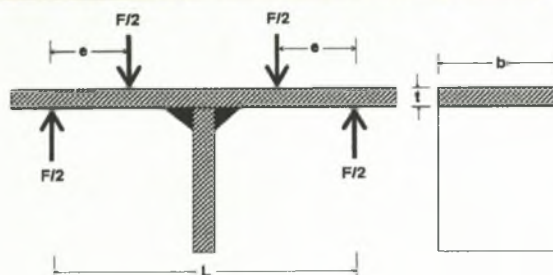


ημερομηνία	αριθμός κύκλων, N	παρατηρήσεις
2/4/2007	2	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST1_160(2))
3/4/2007	450,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST2_160(2))
4/4/2007	416,500	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST3_160(2))
4/4/2007	1,170	τελική θραυση δοκιμίου (αρχείο:pl_ST4_160(2))
	Σύνολο κύκλων φόρτισης, N_f	867,672



ΔΟΚΙΜΗ: Κάμψη τεσσάρων (4) σημείων συγκολλημένων μεταλλικών πλακών (6WA47)

γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίου	
κωδικός δοκιμίου	PL-120(1)
άνοιγμα δοκιμίου, L (mm)	235
πάχος δοκιμίου, t (mm)	15
πλάτος δοκιμίου, b (mm)	95
μοχλοβραχίονας, e (mm)	70



δεδομένα δοκιμής	
Δσ (MPa)	120
R ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)	0.5
Συχνότητα, f (Hz)	5
σ_{\max} (MPa)	240
σ_{\min} (MPa)	120
F _{max} (kN)	24.4
F _{mean} (kN)	18.3
F _{min} (kN)	12.2
ΔF/2 - Span (kN)	6.1
Αρχικό φορτίο δοκιμής (kN)	1.60
Εναρξη Δοκιμής	25/1/2007
Λήξη Δοκιμής	2/2/2007

ημερομηνία	αριθμός κύκλων, N	παρατηρήσεις
25/1/2007	0	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST1_120)
26/1/2007	500,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST2_120)
28/1/2007	750,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST3_120)
30/1/2007	800,000	
30/1/2007	20,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST4_120)
1/2/2007	800,000	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST5_120)
2/2/2007	570,890	στατική δοκιμή με αυξανόμενη μετακίνηση εμβόλου μέχρι το μέγιστο φορτίο επιβολής (αρχείο:pl_ST6_120) - ρηγμάτωση
2/2/2007	20	τελική θραυση δοκιμίου
	Σύνολο κύκλων φόρτισης, N _f	3,440,910



004000091070